ТОМ 8, №3, 2024
eISSN 2541-9129
РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Безопасность техногенных и природных систем

Техносферная безопасность / Technosphere Safety

Машиностроение / Machine Building

Химические технологии, науки о материалах, металлургия / Chemical Technologies, Materials Sciences, Metallurgy



www.bps-journal.ru
DOI 10.23947/2541-9129



Безопасность техногенных и природных систем

Рецензируемый научно-практический журнал (издается с 2017 года)

eISSN 2541-9129
DOI: 10.23947/2541-9129

Том 8, № 3, 2024

Создан в целях освещения результатов исследований и реальных достижений по актуальным вопросам машиностроения, техносферной безопасности, современной металлургии и материаловедения. В журнале освещаются проблемы развития фундаментальных исследований и инженерных разработок в ряде важнейших областей технических наук. Одним из главных направлений деятельности журнала является интеграция в международное информационное пространство.

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям:

2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки)
2.5.21 – Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки)
2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)
2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы (технические науки)
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
2.10.1 – Пожарная безопасность (технические науки)
2.10.2 – Экологическая безопасность (технические науки)
2.10.3 – Безопасность труда (технические науки)

Индексация и архивация:	РИНЦ, CyberLeninka, CrossRef, DOAJ, Index Copernicus, Internet Archive
Наименование органа, зарегистрировавшего издание	Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 66531 от 21 июля 2016 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
Учредитель и издатель	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)
Периодичность	4 выпуска в год
Адрес учредителя и издателя	344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
E-mail	vestnik@donstu.ru
Телефон	+7 (863) 2–738–372
Сайт	https://bps-journal.ru
Дата выхода в свет	30.08.2024





Safety of Technogenic and Natural Systems

Peer-Reviewed Scientific and Practical Journal (Published Since 2017)

eISSN 2541-9129
DOI: 10.23947/2541-9129

Vol. 8, no. 3, 2024

The journal is created in order to highlight the results of research and real achievements on topical issues of Mechanical Engineering, Technosphere Safety, Modern Metallurgy and Materials Science. The journal highlights the problems of the development of fundamental research and engineering developments in a number of important areas of technical sciences. One of the main activities of the journal is integration into the international information space.

The Journal Publishes Articles in the Following Fields of Science:

Ground Transport and Technological Means and Complexes (Engineering Sciences)
Machines, Aggregates and Technological Processes (Engineering Sciences)
Metallurgical Science and Heat Treatment of Metals and Alloys (Engineering Sciences)
Powder Metallurgy and Composite Materials (Engineering Sciences)
Materials Science (Engineering Sciences)
Fire Safety (Engineering Sciences)
Environmental Safety (Engineering Sciences)
Occupational Safety (Engineering Sciences)

Indexing and Archiving:	RISC, CyberLeninka, CrossRef, DOAJ, Index Copernicus, Internet Archive
Name of the Body that registered the publication	Mass Media Registration Certificate ЭЛ № ФС 77 – 66531 Dated Jule, 21, 2016, Issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media
Founder and Publisher	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Don State Technical University (DSTU)
Periodicity	Quarterly (4 Issues Per Year)
Address of the Founder and Publisher	Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation
E-mail	vestnik@donstu.ru
Telephone	+7 (863) 2–738–372
Website	https://bps-journal.ru
Date of Publication	30.08.2024



Editorial Board

Содержание

Contents

ЮБИЛЕЙ УЧЕНОГО
ANNIVERSARY OF THE SCIENTIST

65 лет Бесариону Чохоевичу Месхи — ученому, инженеру, педагогу, руководителю



Бесарион Чохоевич Месхи — доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии образования, депутат Законодательного Собрания Ростовской области, ректор Донского государственного технического университета, член президиума ЮНЦ РАН, руководитель Ростовского научного центра Южного отделения Российской академии образования, председатель Совета ректоров Ростовской области, главный редактор рецензируемых научно-практических журналов «Безопасность техногенных и природных систем» и «Научный альманах стран Причерноморья», входящих в перечень ВАК РФ.

Свою первую профессию инженера-электромеханика Бесарион Чохоевич получил, окончив в 1985 году Ростовский институт сельскохозяйственного машиностроения (РИСХМ) по специальности «Автоматизация сельскохозяйственного производства». С первого курса он проявил себя как активный студент, занимался общественной деятельностью, совмещал учебу и работу в научно-исследовательском отделе. Получив диплом, всю дальнейшую жизнь Бесарион Чохоевич Месхи посвятил родному вузу, пройдя путь от старшего лаборанта учебной части, инженера и старшего инженера кафедры «Автоматизация сельскохозяйственного производства» до руководителя. С 1990 года работал проректором по административно-хозяйственной части, затем с 2002 года проректором по административно-хозяйственной работе и капитальному строительству. В 2007 году сотрудники университета подавляющим большинством голосов (84,3 %) избрали Бесариона Чохоевича Месхи ректором Донского государственного технического университета. Затем еще трижды — в 2012, 2017 и 2022 гг. — коллектив университета переизбирал Б.Ч. Месхи ректором, выказывая ему тем самым уважение и доверие в реализации выбранного пути развития вуза. Параллельно с 2007 по 2018 годы Бесарион Чохоевич возглавлял кафедру «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды». В 2021 году ученый был избран членом-корреспондентом Российской академии образования.

Бесарион Чохоевич Месхи — известный специалист в области технологической и промышленной безопасности, защитивший в 1999 году кандидатскую диссертацию по специальности «Охрана труда» (технические науки), а в 2004 году — докторскую диссертацию по этой же специальности. Он является руководителем научной школы «Теория и методы комплексного обеспечения безопасности труда на машиностроительных производствах и технологического оборудования при его проектировании». Предложенные Бесарионом Чохоевичем научно-технические решения позволили сформировать научно-методологическую основу для повышения безопасности в машиностроительной отрасли. Они реализованы на крупнейших предприятиях региона, таких как ООО «КЗ «Ростсельмаш», ООО «ПК «Новочеркасский электровозостроительный завод», ПАО «Роствертол» и др.

Б.Ч. Месхи — обладатель 39 патентов на изобретения, автор более 700 научных трудов и публикаций. Из них 158 научных статей опубликованы в журналах, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science, 77 статей — в журналах, входящих в перечень ВАК. Индекс Хирша автора (по базе Scopus) — 22.

В настоящее время Бесарион Чохоевич ведет активную многоуровневую работу по подготовке кадров высшей квалификации. Имея огромный опыт по руководству научными проектами, профессор Б.Ч. Месхи является председателем диссертационного совета ДГТУ 24.2.297.05, в котором реализуются защиты кандидатских и докторских диссертаций по специальностям «Безопасность труда» и «Машины, агрегаты и технологические процессы». Под его руководством успешно защищены 3 докторские и 10 кандидатских диссертаций.

Ректор ДГТУ уделяет большое внимание системному развитию инженерного образования по двум направлениям. Первое — внутри вуза, где внедряются современные форматы преподавания, создаются эффективные образовательные площадки: институт опережающих технологий «Школа Икс», институт сквозных технологий «Т-университет», передовая инженерная школа — институт перспективного машиностроения «Ростсельмаш». Второе направление развития — на уровне межвузовских проектов, посредством заключения соглашений о создании совместных экспериментальных площадок инженерного образования с ведущими университетами страны.

За достигнутые успехи в профессиональной деятельности Б.Ч. Месхи награжден медалями ордена «За заслуги перед Отечеством» I и II степени, орденом Дружбы, нагрудным знаком «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации», медалью преподобного Сергия Радонежского I степени Русской православной церкви, нагрудным знаком МЧС России «За заслуги», благодарностью и грамотой Президента Российской Федерации к памятной медали «XXVII Всемирная летняя универсиада 2013 года в г. Казани», знаком отличия «За заслуги перед городом Ростовом-на-Дону», медалью ордена «За заслуги перед Ростовской областью», орденом «За заслуги перед Ростовской областью». В 2009 году Б.Ч. Месхи стал лауреатом премии правительства Российской Федерации в области образования.

Журналистский коллектив издания «Безопасность техногенных и природных систем» сердечно поздравляет Бесариона Чохоевича с юбилеем и желает крепкого здоровья, благополучия, дальнейших успехов в организаторской, научной и преподавательской деятельности.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY





УДК 539.35
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-9-18

Оригинальное теоретическое исследование

Связь изменений повторяемости гроз и количества лесных пожаров на территории Югры с температурой воздуха и солнечной активностью при потеплении климата



EDN: KQQSVJ

А.В. Холопцев ✉
Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Железногорск, Российская Федерация
✉ knd@sibpsa.ru

Аннотация

Введение. Совершенствование методик моделирования и прогнозирования изменений количества лесных пожаров, а также повторяемости гроз, их вызывающих, является актуальной проблемой экологической безопасности, безопасности при чрезвычайных ситуациях, а также климатологии. Наибольший интерес ее решение представляет для регионов лесной ландшафтной зоны, одним из которых в России является Ханты-Мансийский автономный округ (Югра). Отечественными и зарубежными учеными установлено, что во многих регионах к числу эффективных предикторов моделей изучаемых процессов относятся вариации среднесезонных температур воздуха над исследуемыми территориями, а также солнечная активность. Вместе с тем связи таких процессов с названными факторами в Югре изучены недостаточно, что не позволяет оценить целесообразность их учета. Целью данной работы является проверка гипотезы о том, что статистические связи изменений повторяемости гроз и количества лесных пожаров на территории Югры с синхронными или опережающими их по времени вариациями средних за грозоопасный сезон температур воздуха в приземном слое атмосферы и солнечной активностью являются значимыми и усиливаются. Задачи, которые были решены для достижения поставленной цели, состоят в оценке значимости корреляции между изменениями повторяемости гроз над территорией Югры и синхронными вариациями количества возникающих здесь лесных пожаров, а также синхронными и опережающими по времени вариациями среднесезонных температур воздуха и солнечной активности в период потепления климата.

Материалы и методы. Фактический материал исследования составили данные наблюдений о среднесуточных температурах воздуха и датах, в которые происходили грозы над репрезентативными гидрометеорологическими станциями изучаемого района, информация об изменениях среднегодового потока солнечного радиоизлучения с длиной волны 10,7 см, сведения о количестве зарегистрированных лесных пожаров и чрезвычайных ситуаций, ими обусловленных, на территории Югры, представленные в международных и российских климатических банках данных и информационных системах, а также в официальных докладах профильных министерств и ведомств. Методом оценки силы связей между рассматриваемыми процессами явился множественный корреляционный анализ, а оценка статистической значимости выявленных связей выполнена с использования критерия Стьюдента.

Результаты исследования. В результате исследования впервые установлено, что выдвинутая гипотеза о том, что связи изменений повторяемости гроз и количества лесных пожаров на территории Югры с вариациями средних за грозоопасный сезон температур воздуха и солнечной активностью являются значимыми и усиливаются, является справедливой. Доказано, что корреляция межгодовых изменений количества лесных пожаров, возникавших в XXI веке на территории Югры за год, с синхронными вариациями повторяемости над ней гроз была значимой и усиливалась. Выявлены условия, при которых статистические связи между изменениями здесь повторяемости гроз, а также вариациями среднемесячных температур воздуха и солнечной активностью значимы и в настоящее время усиливаются. Следовательно, при выполнении этих условий учет рассматриваемых факторов в ходе моделирования и прогнозирования изучаемого процесса целесообразен.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты в полной мере соответствуют существующим представлениям о влиянии потепления климата и солнечной активности на изменения повторяемости гроз в земной атмосфере, а также об особенностях современных изменений климата Западной Сибири. Выявленные связи могут быть использованы при прогнозировании изменений повторяемостей гроз и лесных пожаров, результаты которого целесообразно учитывать при планировании деятельности соответствующих функциональных подсистем единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: Ханты-Мансийский автономный округ, лесные пожары, грозы, солнечная активность, средние температуры воздуха, корреляция, современный период

Благодарности. Автор выражает благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, устранение которых позволило повысить ее качество.

Для цитирования. Холопцев А.В. Связь изменений повторяемости гроз и количества лесных пожаров на территории Югры с температурой воздуха и солнечной активностью при потеплении климата. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2024;8(3):9–18. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-9-18

Original Theoretical Research

Relationship between Changes in the Frequency of Thunderstorms, the Number of Forest Fires in the Territory of Yugra, and Air Temperature and Solar Activity during Climate Warming

Aleksandr V. Kholoptsev

Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Zheleznogorsk, Russian Federation

knd@sibpsa.ru

Abstract

Introduction. Improving methods for modeling and forecasting changes in the number of forest fires, as well as the frequency of thunderstorms that cause them, is a significant challenge for environmental safety, emergency preparedness, and climatology. This is particularly relevant for regions with a forest landscape, such as the Khanty-Mansi Autonomous Okrug (Yugra). Domestic and foreign researchers have found that variations in seasonal average air temperatures and solar activity are effective predictors for modeling these processes in many regions. However, the connections between these processes and these factors in Yugra remain understudied, hindering our ability to determine the usefulness of including them in predictive models. The aim of the study is to test the hypothesis that there are significant statistical relationships between changes in the frequency of thunderstorms, the number of forest fires in the territory of Yugra, and variations in average air temperatures near the surface of the atmosphere during the thunderstorm season. The study aims to investigate whether these relationships are significant and increasing during periods of climate warming, as well as to assess the impact of solar activity on these relationships. To achieve this goal, we have analyzed the significance of correlation between the changes in the frequency of thunderstorms over the territory of Ugra and synchronous variations in the number of forest fires occurring here, as well as synchronous and ahead of time variations in the average seasonal air temperatures and solar activity in the period of climate warming.

Materials and Methods. The study used observational data on average daily air temperatures, dates of thunderstorms over representative hydrometeorological stations of the studied area, information on changes in average annual solar radiation with a wavelength of 10.7 cm, and information on forest fires and related emergencies in Yugra. The data were obtained from international and Russian climate data banks and systems, as well as official reports from relevant ministries and agencies. The method of assessing the strength of links between processes was multiple correlation analysis. The statistical significance of identified links was assessed using the Student's t-test.

Results. As a result of the study, it was established that the hypothesis put forward was valid. There was the correlation between the changes in the frequency of thunderstorms and the number of forest fires in the territory of Yugra with variations in average air temperatures and solar activity during the thunderstorm season. This trend was significant and increasing. We proved that the correlation of interannual changes in the number of forest fires that occurred in the XXI century in the territory of Yugra per year with synchronous variations in the frequency of thunderstorms over it was significant and intensified. The conditions were identified under which statistical relationships between changes in the frequency of thunderstorms here, as well as variations in average monthly air temperatures and solar activity, were significant and are increasing now. Therefore, when these conditions were met, it was advisable to take into account the factors under consideration during modeling and forecasting of the process under study.

Discussion and Conclusion. The results obtained fully confirm the existing ideas about the impact of climate change and solar activity on the frequency of thunderstorms in the atmosphere, as well as the features of current climate change in Western Siberia. These connections can be used to predict changes in thunderstorm frequency and forest fire risk, and these predictions should be taken into account when planning activities within the unified state emergency management system.

Keywords: Khanty-Mansi Autonomous Okrug, forest fires, thunderstorms, solar activity, mean air temperatures, correlation, modern period

Acknowledgements. The author would like to thank the Editorial team of the Journal and anonymous reviewers for their competent expertise and valuable recommendations for improving the quality of the article.

For citation. Kholoptsev AV. Relationship between Changes in the Frequency of Thunderstorms, the Number of Forest Fires in the Territory of Yugra, and Air Temperature and Solar Activity during Climate Warming. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(3):9–18. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-9-18

Введение. Причиной некоторых ландшафтных пожаров, возникающих в различных регионах мира и наносящих значительный ущерб экосистемам, по мнению российских [1] и зарубежных исследователей [2], являются проходящие над ними грозы. Поэтому совершенствование методик моделирования и прогнозирования изменений повторяемостей гроз является актуальной проблемой экологической безопасности. Наибольший интерес к решению этой проблемы проявляют регионы, обладающих значительными лесными ресурсами, так как в них ландшафтные пожары, являющиеся преимущественно лесными, причиняют экологии, населению и экономике наибольший ущерб.

В России одним из таких регионов является Ханты-Мансийский автономный округ (Югра). Его территория расположена на Западно-Сибирской низменности и характеризуется практически однообразными таежными ландшафтами[1], вследствие чего гидрометеорологическая станция (ГМС) Ханты-Мансийск (61,01°с. ш., 69,06°в. д.) может рассматриваться для нее как репрезентативная.

52 % площади Югры занято лесами, и возникающие здесь пожары ежегодно причиняют существенный ущерб лесному фонду региона [3]. Важной особенностью рассматриваемой территории является то, что около 30 % всех возникающих лесных пожаров бывают вызваны грозами[2].

На рис. 1 показаны территории Югры, относящиеся к зоне контроля, они сравнительно невелики по площади, а основную часть занимает зона лесоавиационных работ. Поэтому данные из Информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз)[3] о количестве лесных пожаров (КЛП) в том иди ином году, возникавших на рассматриваемой территории, вполне достоверны.

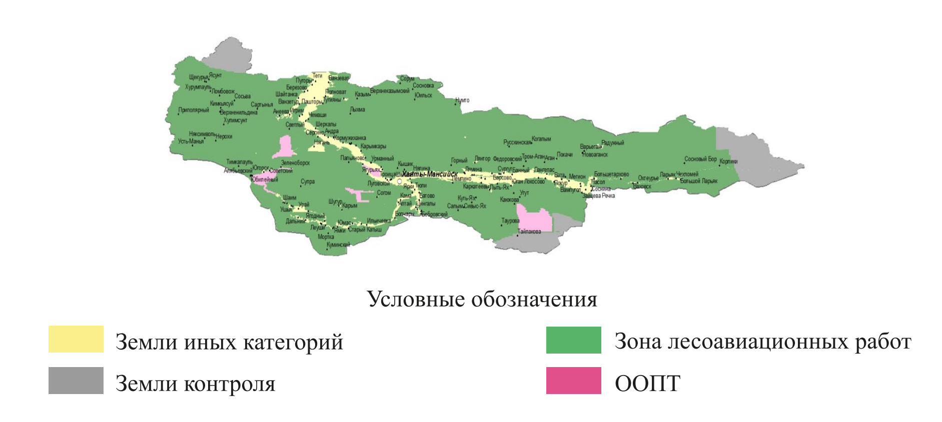


Рис. 1. Участки зон контроля на территории Югры[4]

На территории Югры опасность лесных пожаров повышена потому, что это основной нефтедобывающий регион России. Здесь добыча нефти осуществляется на 406 месторождениях, в том числе на уникальных по своим запасам Самотлорском, Приобском, Федоровском и Мамонтовском [4].

[1] Макунина Г.С. *Западно-Сибирская равнина.* Большая российская энциклопедия (2004–2017). URL: https://old.bigenc.ru/geography/text/4138680 (дата обращения: 19.03.2024).
[2] *Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства.* URL: https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml (дата обращения: 19.03.2024).
[3] *Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства.* URL: https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml (дата обращения: 19.03.2024).
[4] *Схема расположения зоны контроля на территории Ханты-Мансийского автономного округа.* URL: https://aviales.ru/default.aspx?textpage=229 (дата обращения: 06.05.2024).

Основой существующих представлений о моделировании изменений повторяемости гроз (ПГ), а также КЛП над Сибирью являются работы Барановского Н.В. [5], Иванова В.А. и др. [6]. В них показано, что рассматриваемые процессы могут зависеть от многочисленных факторов, некоторые из них не являются наблюдаемыми, поэтому их целесообразно рассматривать как случайные процессы, при моделировании которых эффективен метод множественной регрессии [7].

Упомянутый метод применим и при прогнозировании. Последнее возможно, если факторы изучаемых процессов, которые в прошлом являлись значимыми, останутся значимыми и в будущем, для которого разрабатывается прогноз. Будущее не предопределено, тем не менее выполнимость указанного условия более вероятна, если в прошлом рассматриваемые статистические связи усиливались [8].

Очевидно, что прогноз изучаемого процесса, построенный с учетом подобного фактора, может соответствовать сценарию, при котором основные закономерности, обуславливающие их динамику, в будущем не изменятся.

В исследованиях многих авторов, например Барановского Н.В. [5], Ивановой Г.А. и др. [9], Копейкина М.А. и др. [10], установлено, что к числу значимых факторов ПГ и КЛП на тех или иных территориях Сибири могут относиться синхронные вариации среднесезонных температур присутствующего над ними воздуха и солнечной активности.

Связь изменений ПГ и средних за грозоопасный сезон температур воздуха (СТВ) у земной поверхности является причинной, так как грозы образуются при термической конвекции в грозовых облаках Cb [11], а интенсивность последней тем выше, чем больше средняя температура воздуха в подоблачном слое [12].

Причинной является также связь изменений ПГ и солнечной активности, поскольку вследствие Форбушэффекта [13] последняя значимо влияет на вариации потока галактических и внегалактических космических лучей, входящих в земную атмосферу и участвующих в ионизации воздуха в грозовых облаках. Чем солнечная активность выше, тем интенсивность ионизации воздуха в грозовых облаках ниже, а повторяемость гроз меньше [14].

Связи солнечной активности и изменений СТВ с вариациями КЛП выявлены лишь статистические, тем не менее, в XX веке они были значимы на протяжении нескольких десятилетий [15]. Так как в XX веке оба указанных фактора изучаемых процессов являлись значимыми, их, как правило, учитывают при моделировании. Вопрос о том, целесообразно ли учитывать эти факторы в задачах прогнозирования изучаемых процессов, освещен недостаточно. Установлено, что в спектрах изменчивости ПГ и СТВ присутствуют квазидвухлетние моды [8], вследствие чего статистическая связь между их вариациями при сдвигах по времени на 2–3 года в принципе возможна. Основной модой спектра солнечной активности является одиннадцатилетняя, что также свидетельствует о возможности существования значимой корреляции между изменениями ее характеристик, сдвинутыми по времени на единицы лет [16].

Следовательно, связи изменений ПГ и КЛП с рассматриваемыми факторами, опережающими их на такое время, возможны потому, что эти связи свойственны самим этим факторам. Тем не менее, значимость подобных связей далеко не очевидна.

Представления о значимости рассматриваемых факторов основываются на результатах мониторинга, который проводился в XX веке. Вместе с тем перемены климата, произошедшие на территории Югры в XXI веке, а также разнообразные антропогенные воздействия на экосистемы лесов этого региона могли нарушить связи между изучаемыми процессами и некоторыми их факторами [17]. В результате последнего учет таких факторов при прогнозировании изучаемых процессов может не улучшать, а, напротив, ухудшать оправдываемость его результатов.

В XXI веке мониторинг изучаемых процессов и рассматриваемых их факторов в регионе продолжается. Тем не менее, наличие у связей между его результатами свойств, которые обуславливают целесообразность их учета при моделировании и прогнозировании этих процессов, ранее не проверялось. В результате чего целесообразность их учета нуждается в подтверждении. Следовательно, оценка значимости корреляции между изучаемыми процессами и их факторами, совпадающими и опережающими их по времени, а также выявление тенденции ее изменений представляет не только теоретический, но и практический интерес.

С учетом изложенного целью данной работы является проверка предположения о том, что статистические связи изменений ПГ и КЛП для территории Югры с синхронными или опережающими их по времени вариациями СТВ в приземном слое атмосферы и солнечной активностью в современном периоде являются значимыми и усиливаются.

Для достижения указанной цели проведена оценка значимости корреляции между ПГ над территорией Югры и синхронными изменениями КЛП, синхронными вариациями СТВ и солнечной активности, опережающими по времени вариациями СТВ и солнечной активности для периода современного потепления климата.

Материалы и методы. Как фактический материал о среднесуточных температурах воздуха над репрезентативной ГМС, а также о датах, в которые здесь происходили грозы, использовалась информация, представленная в банке данных об изменениях метеоусловий в различных регионах мира[5], которая соответствует периоду 1961–2023 гг.

[5] *Глобальные климатические данные.* URL: https://en.tutiempo.net/climate (дата обращения: 13.05.2024).

Значение ПГ определялось как отношение количества суток, принадлежащих к грозоопасному сезону (май–сентябрь) изучаемого года, в которые над репрезентативной ГМС возникали грозы, к его общей продолжительности (15 суток).

Значение СТВ вычислялось как среднее значение среднесуточных температур приземного слоя атмосферы над той же ГМС за период с 1 мая по 30 сентября каждого года.

Сведения о КЛП на территории Югры за период 2000–2023 гг., которые также рассматривались как фактический материал, получены из ИСДМ-Рослесхоз[6].

В качестве фактического материала о солнечной активности использована информация из базы данных изменения глобальных климатических индексов[7], об изменениях среднегодового потока солнечного радиоизлучения с длиной волны 10,7 см (индекс СА), измерения которого возможны при любых метеоусловиях и наиболее точны.

Как характеристика силы связи между изучаемыми процессами рассматривалось значение коэффициента их корреляции.

С учетом длины рассматриваемых временных рядов КЛП значения коэффициента их корреляции с синхронными рядами ПГ и индекса СА при решении первой задачи оценивались в скользящем окне длиной 11 лет.

Методика решения второй задачи предполагала вычисление значений коэффициента корреляции рядов ПГ и СТВ, а также ПГ и индекса СА в скользящем окне длиной 11, 22 и 44 года за период с 1961 по 2023 г.

При решении третьей задачи вычислялись значения коэффициента корреляции ряда ПГ, а также рядов СТВ и рядов индекса СА, которые опережают его по времени на 1–3 года.

При вычислении значений коэффициента корреляции линейные тренды, присутствующие в сопоставляемых отрезках рассматриваемых временных рядов, соответствующих каждому скользящему окну, предварительно компенсировались.

Значение коэффициента корреляции рассматривалось как значимое, если достоверность такого статистического вывода, оцененная по критерию Стьюдента (с учетом количества степеней свободы рядов), составляла не менее 0,95.

Как характеристика тенденции изменений коэффициента корреляции изучаемых рядов, вычисленных в скользящем окне той или иной длительности, рассматривалось значение углового коэффициента линейного тренда (УКЛТ) временного ряда, образованного из значений этого коэффициента.

Выявленная тенденция с достоверностью 0,95 рассматривалась как значимая, если:

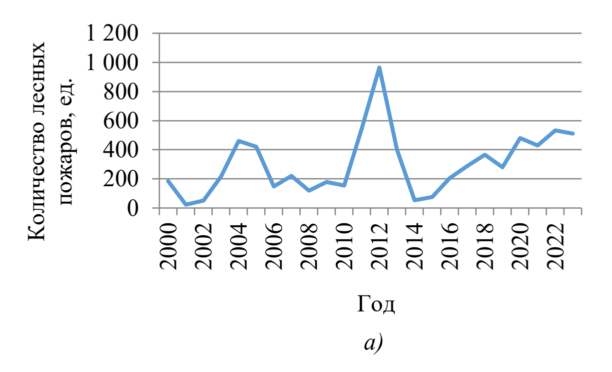
$$N \cdot |A| > 1,65 \cdot CKO,$$

где $|A|$ — модуль углового коэффициента линейного тренда рассматриваемого временного ряда, который вычислен по ряду длиной N; CKO — среднеквадратическое отклонение членов этого ряда от соответствующего тренда.

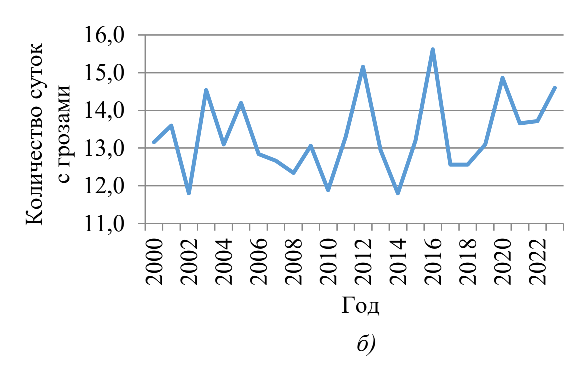
Последнее справедливо, если отклонения членов изучаемого ряда от соответствующего тренда подчиняются нормальному закону. Тем не менее, проверку справедливости подобного допущения в отношении изучаемых рядов с применением критерия Пирсона не позволила осуществить малая их длина. Поэтому полученные результаты следует рассматривать как носящие качественный характер.

Результаты исследования. В соответствии с изложенной методикой при решении первой задачи сформированы временные ряды количества гроз, возникавших за грозоопасный сезон (а фактически за год) над репрезентативной ГМС и КЛП на территории Югры.

Соответствующие зависимости от времени этих показателей представлены на рис. 2.



а)



б)

Рис. 2. Зависимости от времени количества событий, возникавших за год над гидрометеорологической станцией Ханты-Мансийск: *а* — количество лесных пожаров; *б* — количество суток с грозами

[6] *Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства.* URL: https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml (дата обращения: 12.10.2023).
[7] *Корреляция среднемесячных значений климатических временных рядов.* URL: https://psl.noaa.gov/data/correlation/solar.data (дата обращения: 13.05.2024).

На рис. 2 видно, что обе показанные на нем зависимости представляют собой сложные колебания, у которых периоды наиболее мощных короткопериодных мод практически совпадают. При этом в период до 2011 года максимумы зависимости от времени количества гроз не совпадают с аналогичными экстремумами такой же зависимости КЛП.

Начиная с 2012 года совпадают почти все одноименные экстремумы рассматриваемых зависимостей, следовательно, их корреляция явно усилилась. Последнее подтверждают и расчеты.

Коэффициент корреляции рассматриваемых рядов за период 2000–2023 гг. составил 0,484, что (при количестве степеней свободы рядов 23) превышает пороговый уровень 0,44, соответствующий достоверности вывода 0,95. Следовательно, корреляция временных рядов ПГ и КЛП для территории Югры значима и в XXI веке (последнее было вполне ожидаемо, поскольку, как уже отмечалось выше, здесь около 30 % лесных пожаров вызвали грозы). Корреляция за тот же период рядов КЛП и СТВ также являлась значимой, что подтверждает справедливость вывода [9] о существенности влияния потепления климата России на возгорание лесов.

Аналогичным образом установлено, что в период 2000–2023 гг. корреляция временных рядов КЛП, а также рядов индекса СА значимой не являлась. Последнее вполне понятно, так как периоды наиболее мощных мод спектров межгодовых изменений КЛП и индекса СА отличаются в 3–4 раза.

Анализ связей временных рядов КЛП на территории Югры с опережающими их по времени рядами индекса СА, СТВ и ПГ над репрезентативным пунктом показал, что корреляция между ними, оцененная в скользящем окне длиной 11 лет, значимой не являлась и с течением времени становилась слабее. Поэтому при моделировании изменений КЛП над территорией Югры учет вариаций индекса СА, СТВ и ПГ целесообразен, однако прогнозирование этих изменений с применением тех же предикторов, опережающих изучаемый процесс на 1–3 года, неэффективно.

В результате решения второй задачи рассчитаны значения коэффициента корреляции синхронных отрезков рядов ПГ и СТВ, а также ПГ и индекса СА, соответствующих скользящим окнам длиной 11, 22 и 44 года.

С учетом этих значений построены зависимости коэффициента указанных рядов от года начала соответствующего скользящего окна (рис. 3).

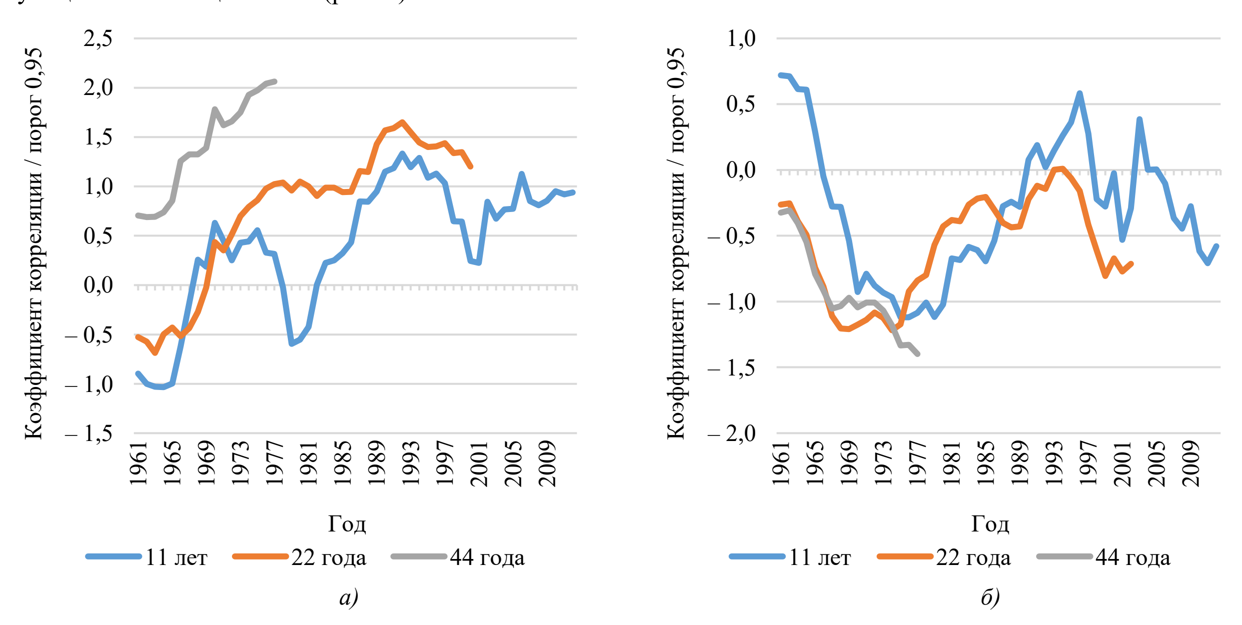


Рис. 3. Зависимости от года начала скользящих окон длиной 11, 22 и 44 года, соответствующих им отношений к порогу значимости коэффициента синхронной корреляции изменений ПГ над ГМС Ханты-Мансийск, а также вариаций: *а* — СТВ; *б* — индекса СА

Данные на рис. 3 *а* показывают, что зависимости от года начала скользящих окон длиной 22 и 44 года, соответствующих им отношений к порогу значимости коэффициента корреляции изменений ПГ над ГМС Ханты-Мансийск, а также синхронных с ними вариаций СТВ описываются в среднем возрастающими функциями. Значения этих показателей для окон, соответствующих современному периоду (2000–2023 гг. и 1978–2023 гг.) превышают 1 (т. е. являются значимыми). Следовательно, сценарий, при котором в ближайшем будущем СТВ останется значимым фактором ПГ, более вероятен, чем альтернативный сценарий.

Рассматриваемая зависимость, которая соответствует скользящему окну в 11 членов, носит осциллирующий характер. Для окна, соответствующего современному периоду (2012–2023 гг.), значение коэффициента корреляции рядов ПГ и СТВ несколько не достигает уровня значимости. Достоверность статистического вывода об их значимости составляет не менее 0,94.

Полученный результат подтверждает целесообразность учета вариаций СТВ при моделировании изменений ПГ над территорией Югры, происходящих в XXI веке.

На рис. 3 *б* показано, что зависимости отношений коэффициента корреляции изменений ПГ над ГМС Ханты-Мансийск, а также синхронных с ними вариаций индекса СА к порогу значимости для скользящих окон длиной 11 и 22 года также представляют собой сложные колебания. Значения этого показателя для современных периодов значительно меньше 1 (корреляция значимой не является).

Для скользящего окна длиной 44 года изучаемая зависимость является монотонной, а для периода 1978–2023 гг. корреляция изучаемых процессов отрицательна и значима (достоверность такого вывода превышает 0,95). Следовательно, при моделировании изменений ПГ на столь продолжительных отрезках времени, включающих в себя и современный период, учет вариаций индекса СА также целесообразен.

При решении третьей задачи установлено, что такой же вывод справедлив и для задач прогнозирования изменений ПГ, в которых в качестве предикторов множественно-регрессионных моделей используются ряды индекса СА.

Как подтверждение этому на рис. 4 представлены зависимости от года начала скользящего окна длиной 44 года коэффициента корреляции изменений ПГ над ГМС Ханты-Мансийск, а также опережающих их по времени на 1–3 года вариаций индекса СА и СТВ.

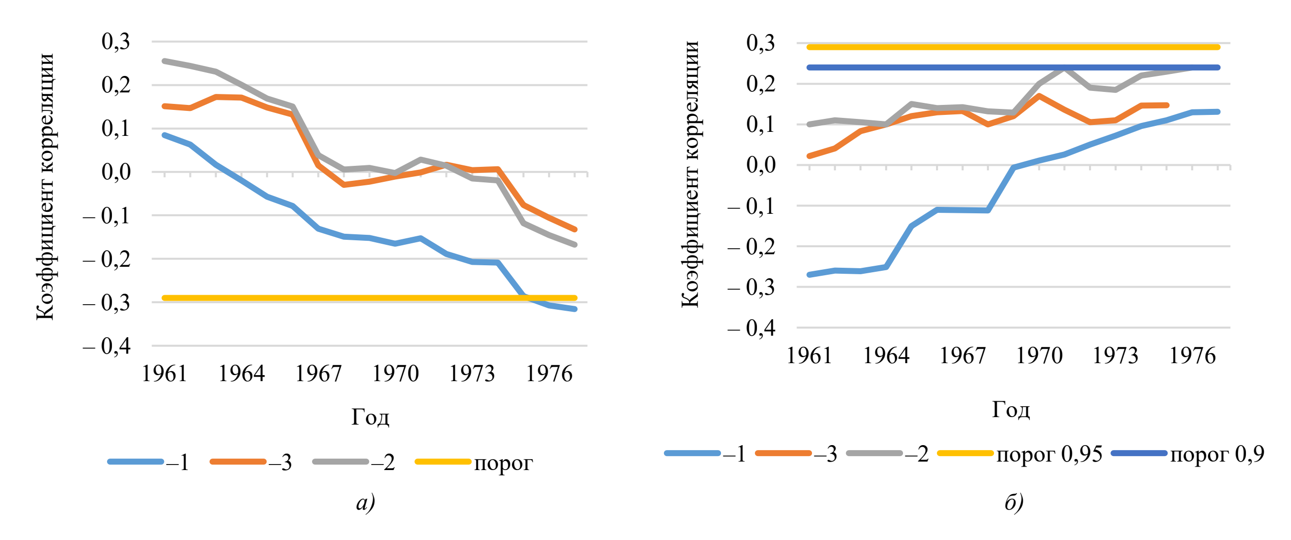


Рис. 4. Зависимости от года начала скользящего окна длиной 44 года коэффициента корреляции изменений ПГ над ГМС Ханты-Мансийск, а также опережающих их по времени на 1–3 года вариаций: *а* — индекса СА; *б* — СТВ

По данным на рис. 4 *а* видно, что за период современного потепления климата корреляция отрезков длиной 44 года временных рядов ПГ над репрезентативной ГМС, а также опережающих их по времени на 1 год отрезков рядов индекса СА усиливалась и на отрезке времени 1975–2023 гг. является значимой.

Если ряды индекса СА опережают ряды ПГ на большее время, их корреляция за тот же период также усиливается, но выбранного уровня значимости не достигает.

Как следует из данных на рис. 4 *а*, вероятность того, что на отрезках времени, включающих в себя также ближайшее будущее, корреляция рядов ПГ и индекса СА останется значимой, выше, чем вероятность альтернативного сценария. Следовательно, учет изменений этого фактора при прогнозировании ПГ над территорией Югры на предстоящий год способствовал бы повышению оправдываемости его результатов.

Данные на рис. 4 *б* свидетельствуют о том, что значения коэффициента корреляции изменений ПГ над той же ГМС на интервале времени длиной 44 года, а также опережающих их на 1–3 года вариаций СТВ за период современного потепления климата увеличивались. Из этого следует, что сценарий, при котором в будущем они станут больше, более вероятен, чем альтернативный сценарий. Вместе с тем достоверность вывода о значимости рассматриваемых связей на отрезке времени 1978–2023 гг. достигла лишь уровня 0,9 (при условии, что ряд СТВ опережает ряд ПГ на 2 года).

Аналогичные исследования, выполненные для сопоставляемых отрезков времени меньшей длины, показали, что зависимости от времени коэффициента корреляции изменений ПГ над той же ГМС, а также опережающих их на 1–3 года вариаций индекса СА и СТВ носят осциллирующий характер (тенденции этих процессов знакопеременны). Для отрезков ряда ПГ, включающих 2023 год, значения коэффициента их корреляции с опережающими по времени рядами рассматриваемых факторов значительно меньше (по модулю) порога значимой корреляции. Следовательно, какие-либо основания полагать, что учет столь коротких отрезков временных рядов рассматриваемых факторов при прогнозировании изменений ПГ над ГМС Ханты-Мансийск, запаздывающих по отношению к ним на 1–3 года, приведет к положительным результатам, не выявлены.

Таким образом, установлено, что выдвинутая гипотеза в отношении синхронных связей изменений КЛП для территории Югры с вариациями ПГ и СТВ является справедливой. Справедлива она и для синхронных связей изменений ПГ с вариациями СТВ и индекса СА. Рассматриваемая гипотеза справедлива также в отношении связей изменений ПГ, а также вариаций индекса СА, опережающих их на 1 год.

Кроме того, показано, что в настоящее время связи изменений на отрезках времени 44 года ПГ над территорией Югры, а также опережающих их вариаций индекса СА и СТВ усиливаются, вследствие чего в будущем такие связи могут стать значимыми и при других значениях этих опережений.

Полученные результаты в полной мере соответствуют существующим представлениям о влиянии потепления климата и солнечной активности на изменения повторяемости гроз в земной атмосфере [1], в том числе публикуемых Росгидрометом[8], а также об особенностях современных изменений климата Западной Сибири [3].

Обсуждение и заключение. Статистические связи изменений КЛП и ПГ, а также КЛП и СТВ на территории Югры в XXI веке не только являются значимыми, но и существенно усиливаются. Следовательно, целесообразен и учет результатов мониторинга СТВ и ПГ при моделировании возгорания лесов на территориях, относящихся к зоне контроля, а также при управлении деятельностью его противопожарных подразделений (согласно Федеральным законам 69-ФЗ и 123-ФЗ).

Корреляция изменений ПГ над территорией Югры, а также совпадающих с ними по времени вариаций СТВ на отрезках времени, завершающихся 2023 годом, значима и усиливается при условии, что их длина составляет не менее 11 лет. Для такого фактора, как вариации индекса СА, она значима и усиливается лишь при условии, что длина соответствующих отрезков не менее 44 лет.

Корреляция изменений ПГ над территорией Югры с опережающими их по времени на 1 год вариациями индекса СА значимы и усиливаются при условии, что она оценена для отрезков времени продолжительностью не менее чем 44 года. При больших значениях таких опережений связь между этими процессами также усиливается, но уровня значимости к 2023 году не достигла.

Таким образом, установлено, что выявленные особенности статистических связей изменений в период современного потепления климата количества лесных пожаров и повторяемости гроз над территорией Ханты-Мансийского автономного округа (Югры) между собой, а также с вариациями среднесезонных температур воздуха и солнечной активности соответствуют существующим представлениям о причинах существования этих связей.

В XXI веке синхронные связи изменений количества лесных пожаров, возникавших за год на территории изучаемого региона, с вариациями повторяемости над ней гроз значимы и усиливаются. Это позволяет предположить, что часть общего количества образующихся здесь лесных пожаров, обусловленных действием грозовых разрядов, в будущем увеличится.

Связи изменений в изучаемом регионе среднесезонных температур воздуха за грозоопасный период с синхронными вариациями повторяемости за тот же сезон гроз и количества лесных пожаров целесообразно учитывать при моделировании этих процессов, так как установлено, что с потеплением климата они усиливались и для современного периода значимы.

Связи изменений солнечной активности с синхронными, а также запаздывающими по отношению к ним на 1 год вариациями повторяемости гроз над рассматриваемой территорией целесообразно учитывать при прогнозировании последних, так как за тот же период произошло их усиление и для современного периода достоверность вывода об их значимости превышает 0,95.

Список литературы / References

1. Иванов В.А., Пономарев Е.И., Иванова Г.А. Малькaнова А.В. Грозы и лесные пожары в современных климатических условиях Средней Сибири. *Метеорология и гидрология.* 2023;7:102–113.

Ivanov VA, Ponomarev EI, Ivanova GA, Mal'kanova AV. Lightning and Forest Fires in Current Climatic Conditions of Central Siberia. *Meteorologiya i Gidrologiya.* 2023;7:102–113. (In Russ.)

2. Pérez-Invernón FJ, Huntrieser H, Soler S, Gordillo-Vázquez FJ, Pineda N, Navarro-González J, et al. Lightning-Ignited Wildfires and Long-Continuing-Current Lightning in the Mediterranean Basin: Preferential Meteorological Conditions. *Atmospheric Chemistry and Physics.* 2021;21(23):17529–17557. https://doi.org/10.5194/acp-2021-125

3. Куплевацкий С.В. Шабалина Н.Н. Лесные пожары в Уральском федеральном округе и их влияние на экологию. *Леса России и хозяйство в них.* 2020;4(75):4–12. https://doi.org/10.51318/FRET.2020.36.84.001

Kuplevatskiy SV, Shabalina NN. Forest Fires in the Ural Federal District and Their Impact on the Environment. *Forests of Russia and Economy in Them.* 2020;4(75):4–12. https://doi.org/10.51318/FRET.2020.36.84.001 (In Russ.)

[8] *Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме.* Санкт-Петербург: Наукоемкие технологии; 2022. 124 с. URL: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/compressed.pdf (дата обращения: 14.05.2024).

4. Кузьменков С.Г., Исаев В.И., Булатов В.И., Аюпов Р.Ш., Игенбаева Н.О., Кузьмин Ю.А. и др. Развитие нефтегазового комплекса Югры, трудноизвлекаемые запасы. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018;329(11):103–113. https://doi.org/10.18799/24131830/2018/11/214

Kuzmenkov SG, Isaev VI, Bulatov VI, Ayupov RSh, Eginbaeva NO, Kuzmin YuA, et al. Development of Yugra Oil and Gas Complex, Hard-to-Extract Reserves. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018;329(11):103–113. https://doi.org/10.18799/24131830/2018/11/214 (In Russ.)

5. Барановский Н.В. *Прогнозирование лесной пожарной опасности в условиях грозовой активности*. Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН; 2019. 235 с.

Baranovskii NV. *Forecasting of Forest Fire Danger in Conditions of Thunderstorm Activity.* Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2019. 235 p. (In Russ.)

6. Иванов В.А., Иванов А.В., Пономарев Е.И. Природа пожаров от гроз в лесах Сибири. В: *Сборник трудов VIII Всероссийской научно-практической конференции «Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций»*. Железногорск: ФГБОУ ВО «Сибирская пожарно-спасательная академия государственной противопожарной службы»; 2018. С. 9–11.

Ivanov VA, Ivanov AV, Ponomarev EI. The Nature of Fires from Thunderstorms in the Forests of Siberia. In: *Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference "Monitoring, Modeling and Forecasting of Natural Hazards and Emergencies"*. Zheleznogorsk: Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service; 2018. P. 9–11. (In Russ.)

7. Дрейпер Н., Смит Г. *Прикладной регрессионный анализ*. Москва: Диалектика; 2017. 912 с.

Dreiper N, Smit G. *Applied Regression Analysis.* Moscow: Dialektika; 2017. 912 p. (In Russ.)

8. Холопцев А.В., Никифорова М.П. *Солнечная активность и прогнозы физико-географических процессов.* Saarbrucken: Lap Lambert Academic Publishing; 2013; 340 с.

Kholoptsev AV, Nikiforova MP. *Solar Activity and Forecasts of Physical and Geographical Processes.* Saarbrucken: Lap Lambert Academic Publishing; 2013; 340 p. (In Russ.)

9. Иванова Г.А., Иванов В.А., Мусохранова А.В., Онучин А.А. Лесные пожары и причины их возникновения на территории Средней Сибири *Сибирский лесной журнал.* 2023;6:6–16. https://doi.org/10.15372/SJFS20230602

Ivanova GA, Ivanov VA, Musokhranova AV, Onuchin AA. Forest Fires and the Causes of Their Occurrence in Central Siberia. *Sibirskij Lesnoj Zurnal.* 2023;6:6–16. https://doi.org/10.15372/SJFS20230602 (In Russ.)

10. Копейкин М.А., Коптев С.В., Третьяков С.В. Влияние солнечной активности на лесные пожары в Архангельской области. *Лесной вестник. Forestry Bulletin*. 2021;25(3):73–81. https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-3-73-81

Kopeykin MA, Koptev SV, Tretyakov SV. Impact of Solar Activity on Forest Fires in Arkhangelsk Region. *Forestry Bulletin.* 2021;25(3):73–81. https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-3-73-81 (In Russ.)

11. James RJ, Nkechinyere IE. The Mechanism of Thunderstorms and its Environmental Effects (A Review). *Asian Journal of Basic Science & Research.* 2022;4(3):55–60. http://doi.org/10.38177/AJBSR.2022.4308

12. Данилова Н.Е., Семенова Ю.А., Смерек Ю.Л., Закинян Р.Г. Влияние подоблачной конвекции на развитие облачной конвекции. *Наука. Инновации. Технологии.* 2018;4:131–150. https://doi.org/10.37495/2308-4758-2018-4-131-150

Danilova NYe, Semyonova YuA, Smerek YuL, Zakinyan RG. Influence Under-Cloudy Convections on Development of a Cloudy Convection. *Science. Innovations. Technologies.* 2018;4:131–150. https://doi.org/10.37495/2308-4758-2018-4-131-150 (In Russ.)

13. Васильев М.С. *Причинно-следственные связи лесных пожаров и абиотических факторов на территории Якутии*. Дис. канд. географ. наук. Москва; 2022. 220 с.

Vasilev MS. *Causal Relationships of Forest Fires and Abiotic Factors in the Territory of Yakutia.* Thesis for a Candidate Degree in Geography. Moscow; 2022. 220 p. (In Russ.)

14. Ермаков В.И., Стожков Ю.И. *Физика грозовых облаков*. Москва: Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН; 2004. 38 с. URL: https://preprints.lebedev.ru/wp-content/uploads/2011/12/2004_2.pdf (дата обращения: 14.05.2023).

Ermakov VI, Stozhkov YuI. *Physics of Thunderclouds.* Moscow: Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences; 2004. 38 p. URL: https://preprints.lebedev.ru/wp-content/uploads/2011/12/2004_2.pdf (accessed: 14.05.2023). (In Russ.)

15. Тартаковский В.А., Чередько Н.Н. Влияние солнечной активности на приземную температуру Северного полушария. *Оптика атмосферы и океана.* 2017;30(12):1059–1064. http://doi.org/10.15372/AOO20171209

Tartakovsky VA, Cheredko NN. Sun Effect on Surface Temperature in the Northern Hemisphere. *Optika Atmosfery i Okeana.* 2017;30(12):1059–1064. http://doi.org/10.15372/AOO20171209 (In Russ.)

16. Петухов Е.И. Солнечная активность в прошлом и в наше время. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2023;2–2(77):121–124. https://doi.org/10.24412/2500-1000-2023-2-2-121-124

Petukhov EI. Solar Activity in the Past and in Our Time. *Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk.* 2023;2–2(77):121–124. https://doi.org/10.24412/2500-1000-2023-2-2-121-124 (In Russ.)

17. Кузнецова Э.А., Соколов С.Н., Кушанова А.У., Прасина Ю.А. Динамические особенности погодно-климатического режима города Ханты-Мансийска. *Успехи современного естествознания*. 2021;6:82–87. https://doi.org/10.17513/use.37645

Kuznetsova EA, Sokolov SN, Kushanova AU, Prasina YuA. Dynamic Features of the Weather and Climate Regime in the City of Khanty-Mansiysk. *Advances in current natural sciences*. 2021;6:82–87. https://doi.org/10.17513/use.37645 (In Russ.)

Об авторе:

Александр Вадимович Холопцев, доктор географических наук, профессор кафедры контрольно-надзорной деятельности Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (662970, Российская Федерация, г. Железногорск, ул. Северная, 1), SPIN-код: 2419-5410, ORCID, ScopusID, kndp@sibsa.ru

Конфликт интересов: **автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.**

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

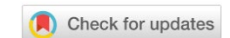
Aleksandr V. Kholoptsev, Dr. Sci. (Geogr.), Professor of the Department of Control and Supervisory Activity, Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire and Rescue Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia (1, Severnaya St., Zheleznogorsk, 662970, Russian Federation), SPIN-code: 2419-5410, ORCID, ScopusID, kndp@sibsa.ru

Conflict of Interest Statement: **the author does not have any conflict of interest.**

The author has read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 20.05.2024
Поступила после рецензирования / Revised 07.06.2024
Принята к публикации / Accepted 14.06.2024

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY

УДК 504.05/06

https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-19-28

Оригинальное эмпирическое исследование

Повышение экологической безопасности предприятий стройиндустрии на основе современной технологии пылеподавления



EDN: JDCNLX

В.И. Беспалов ✉, **О.С. Гурова**

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ izos-rgsu@mail.ru

Аннотация

Введение. В современном мире особое внимание уделяется качеству атмосферного воздуха. Одним из основных факторов негативного воздействия на атмосферу является выброс загрязняющих веществ, среди которых наиболее массово наблюдаются твердые (пылевые) частицы от промышленных источников. При высоких концентрациях пыли устройства очистки, даже обладая высокой эффективностью (до 95,0 %), не справляются с нагрузкой. Именно поэтому разработка и совершенствование высокоэффективных устройств очистки воздуха от пыли являются весьма актуальными. В связи с этим в качестве научной проблемы авторами выделена необходимость совершенствования инженерных средств очистки воздуха от пыли за счет разделения дисперсной фазы (пылевых частиц) и дисперсионной среды (воздуха), что в конечном счете приведет к повышению эффективности очистки. Целью данного исследования явилось повышение экологической безопасности территорий промышленных площадок предприятий стройиндустрии и прилегающих селитебных зон на основе применения упомянутых высокоэффективных средств очистки воздуха от пыли.

Для достижения поставленной цели авторами решены следующие задачи: применена физико-энергетическая концепция и разработана блок-схема физической модели процесса снижения загрязнения воздушной среды различными видами строительной пыли, разработано высокоэффективное и экономичное устройство гидродинамической очистки вентиляционного воздуха от плохо смачиваемой слипающейся пыли, проведены экспериментальные исследования для выявления реального диапазона значений эффективности очистки воздуха от пыли.

Материалы и методы. В основу исследований авторами положены методы физического моделирования, математического описания и статистической обработки экспериментальных данных.

Результаты исследования. В результате исследований установлено, что:

– в основу разработки высокоэффективного и экономичного устройства очистки воздуха от различных видов строительной пыли может быть положена предложенная авторами физико-энергетическая научная концепция, описывающая процессы загрязнения и снижения загрязнения воздушной среды;

– поэтапное рассмотрение процесса загрязнения воздушной среды может быть основой научного обоснования и описания процесса снижения загрязнения воздушной среды предприятий строительной индустрии;

– на основании выполненного анализа процесса снижения загрязнения воздушной среды различными видами строительной пыли возможна разработка блок-схемы физической модели этого процесса;

– изучение особенностей поведения и свойств пылевого аэрозоля и направленных на него внешних силовых воздействий дает возможность наметить основные направления, технологии и инженерные средства повышения эффективности процесса очистки и разработать высокоэффективное и экономичное устройство, реализующее этот процесс;

– для исследования диапазона изменения значений эффективности очистки воздуха от пыли проведен ряд экспериментальных исследований в лабораторных условиях.

Обсуждение и заключение. Выполненные исследования позволили установить, что повышение эффективности очистки воздуха от пыли с содержанием от 20 до 70 % SiO_2 обеспечивается в устройстве за счет ряда конструктивных изменений, приводящих к интенсификации смачивания, связывания и удаления из воздуха пылевых частиц. При этом высокие значения (96,5–98,7 %) интегральной эффективности обеспечивают нормативные экологические требования к качеству воздуха приземного слоя атмосферы.

Техносферная безопасность

Ключевые слова: экологическая безопасность, пылеподавление, устройство очистки воздуха, повышение эффективности

Благодарности. Авторы благодарят доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой «Производственная безопасность» С.Л. Пушенко за содействие в организации лабораторных экспериментов.

Для цитирования. Беспалов В.И., Гурова О.С. Повышение экологической безопасности предприятий стройиндустрии на основе современной технологии пылеподавления. *Безопасность природных и техногенных систем.* 2024;8(3):19–28. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-19-28

Original Empirical Research

Improving the Environmental Safety of Construction Industry Enterprises through the Use of Modern Dust Suppression Technologies

Vadim I. Bespalov ✉, **Oksana S. Gurova**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ izos-rgsu@mail.ru

Abstract
Introduction. In the modern world, special attention is paid to the quality of atmospheric air. One of the major contributors to air pollution is the release of harmful substances, including solid particles from industrial activities. These particles can accumulate in high concentrations, making it difficult for even the most efficient (up to 95.0%) cleaning devices to keep up. That is why the development and improvement of highly efficient air purification devices from dust are very relevant. In this regard, as a scientific problem, the authors highlighted the need to improve engineering means of air purification from dust by separating the dispersed phase (dust particles) and the dispersion medium (air), which ultimately will lead to an increase in cleaning efficiency. The aim of this study is to improve the environmental safety of industrial sites of construction industry enterprises and adjacent residential areas by using highly effective means of air purification.
To achieve this goal, we have developed a physics and power-engineering concept and created a block diagram of a physical model for reducing air pollution from construction dust. We have also developed a highly efficient and economical device for hydrodynamic purification of ventilation air from poorly wetted clumping dust. The experiments were conducted to identify the real range of values of the efficiency of air purification from dust.
Materials and Methods. The research is based on methods of physical modeling, mathematical description, and statistical analysis of experimental data.
Results. As a result of the research, it was found that:
– the basis for the development of a highly efficient and economical air purification device from various types of construction dust could be based on the physics and power-engineering scientific concept proposed by the authors, describing the processes of pollution and reduction of air pollution;
– step-by-step consideration of the process of air pollution could be the basis for scientific justification and description of the process of air pollution reduction in the construction industry;
– based on the analysis of the process of the reduction of air pollution by various types of construction dust, it was possible to develop a block diagram of a physical model of this process;
– the study of the behavior and properties of dust aerosol and external force influences directed at it made it possible to outline the main directions, technologies and engineering means to increase the efficiency of the cleaning process and develop a highly efficient and economical device that implemented this process;
– to study the range of changes in the values of the efficiency of air purification from dust, a number of experimental studies were conducted in laboratory conditions.
Discussion and Conclusion. The studies conducted allowed us to determine that an increase in air purification efficiency from dust with a SiO_2 content of 20–70% was achieved in the device through a series of design modifications that enhanced wetting, bonding, and removal of particulate matter from the air. Simultaneously, high levels of integrated efficiency (96.5–98.7%) ensured the compliance with regulatory environmental standards for atmospheric surface air quality.

Keywords: environmental safety, dust suppression, air purification device, efficiency improvement

Acknowledgements. The authors would like to thank Head of the Industrial Safety Department, Dr. Sci. (Engeneering), Professor S.L. Pushenko for his assistance in organizing laboratory experiments.

For citation. Bespalov VI, Gurova OS. Improving the Environmental Safety of Construction Industry Enterprises through the Use of Modern Dust Suppression Technologies. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(3):19–28. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-19-28

Введение. В настоящее время большим спросом у различных потребителей, связанных со строительной деятельностью, пользуются сухие строительные смеси. Кроме того, особое место при этом занимает производство связующих высокодисперсных материалов: гипса, цемента, плиточного клея, фасадного клея и других [1, 2]. На подготовительном технологическом этапе производства таких материалов в соответствии со стандартами осуществляются просеивание и дробление (измельчение) исходного сырья, например, клинкера. В целом же технология изготовления любой сухой строительной смеси представляет собой процесс, включающий в себя следующие основные этапы: засыпку измельченного сырья, смешивание разных ингредиентов и расфасовку смеси. В каждом конкретном случае технологии могут отличаться от базовой в зависимости от особенностей рецептов приготовления смесей, вида исходного продукта, количества и видов используемых ингредиентов и соответствующего им технологического оборудования.

С точки зрения обеспечения требуемых экологических нормативов содержания пылевых частиц в воздухе территорий промплощадок предприятий по изготовлению строительных смесей и связующих материалов наиболее уязвимыми являются участки дробления исходного сырья [3]. Именно здесь наблюдается интенсивное образование основных видов строительной пыли: цементной, гипсовой, песчаной и других с содержанием от 20 до 70 % SiO_2 и с преобладающим размером частиц PM2,5 и PM10. При последующем выделении эта пыль приводит к превышению $ПДК_{рз}$ в воздухе рабочих зон предприятий строительной индустрии и $ПДК_{мр}$ ($ПДК_{сс}$) в воздухе приземного слоя атмосферы как территорий промышленных площадок этих предприятий, так и территорий прилегающих селитебных зон. Негативное воздействие пыли проявляется в случае ее проникновения в организм человека через органы дыхания, желудочно-кишечный тракт, кожные покровы и слизистые оболочки. При этом наибольшую опасность представляют именно частицы пыли размером PM2,5 и PM10 [1, 4].

В результате по основным перечисленным выше видам промышленной пыли наблюдается превышение соответствующих значений ПДК в 5–25 раз, что составляет от 10 до 300 мг/м^3 без применения инженерных средств пылеподавления. Такое состояние воздушной среды приводит к негативному воздействию пыли на работников предприятий и население прилегающих территорий [5–7]. Необходимо еще отметить, что применение современных средств пылеподавления в виде устройств улавливания пыли в помещениях (вытяжные панели, зонты и т. п.) с последующим удалением этой пыли из внутренних объемов производственных помещений с максимальными значениями ее концентрации в большинстве случаев, с одной стороны, эффективно обеспечивают санитарно-гигиенические требования, но, с другой стороны, создают при этом довольно высокие концентрации пыли, с которыми современные устройства очистки воздуха, даже обладая высокой эффективностью (до 95,0 %), не справляются и не обеспечивают соблюдения экологических нормативов. В этом заключается научная проблема совершенствования инженерных средств обеспыливания выбрасываемого в атмосферу воздуха за счет повышения эффективности очистки воздуха от пыли (свыше 96,0 %). Таким образом, целью данного исследований является разработка высокоэффективных современных технологий и средств пылеподавления для повышения экологической безопасности территорий промышленных площадок предприятий стройиндустрии и прилегающих селитебных зон.

Материалы и методы. В исследовании использовались аналитический метод изучения накопленного опыта в научно-технической сфере, а также методы построения физической модели в совокупности с математическим описанием результирующих характеристик данного процесса. Кроме того, использованы методы статистической обработки результатов лабораторных исследований, полученных авторами, и сопоставления их с результатами аналогичных исследований других ученых.

При этом в качестве объекта исследования выбрано устройство, осуществляющее очистку воздуха от пыли строительных производств как один из основных этапов процесса пылеподавления, эффективность которого зависит от основных физико-химических свойств дисперсной фазы и дисперсионной среды пылевого аэрозоля при внешнем воздействии на него с целью его разрушения. А предметом исследования является повышение эффективности устройства очистки воздуха от пыли до уровня обеспечения экологической безопасности территорий промышленных площадок предприятий стройиндустрии и прилегающих селитебных зон.

Наиболее приемлемым для разработки устройства очистки воздуха от пыли с содержанием от 20 до 70 % SiO_2 является подход, основанный на применении физико-энергетический концепции [5], который дает возможность установить физические связи между всеми объектами процесса снижения загрязнения (пылевым аэрозолем, устройством очистки с его активной зоной и внешними силовыми воздействиями), наметить технологии повышения эффективности очистки и разработать конструкцию наиболее эффективного для рассматриваемых условий устройства очистки воздуха от перечисленных видов пыли предприятий строительной индустрии.

Результаты исследования. Разработка высокоэффективного и экономичного устройства очистки воздуха от строительной пыли основана на предложенном авторами физико-энергетическом научном подходе, который позволяет описать процессы загрязнения и снижения загрязнения воздушной среды [5–7]. Эта концепция базируется на рассмотрении дисперсной системы «загрязняющее вещество», изменяющей в процессе загрязнения воздуха параметры своего состояния и переходящей из одного качества (пылевой материал) в другое (пылевой аэрозоль) [5, 8]. Так, при обработке сырья (строительных материалов) на технологическом оборудовании наблюдается образование пылевых частиц и формирование пылевого материала. Затем образовавшийся пылевой материал выделяется из объема сырья в пространство производственного помещения и формируется пылевой аэрозоль. И, наконец, пылевой аэрозоль, распространяясь в пространстве производственного помещения, выделяется в воздух приземного слоя атмосферы территорий промышленных площадок предприятий стройиндустрии и прилегающих селитебных зон с последующим рассеиванием.

При этом необходимо отметить, что этапы образования и внутреннего выделения пыли позволяют осуществить возврат пылевых частиц в исходный технологический материал, что с экологической и экономической позиций весьма выгодно, но не всегда реализуемо с точки зрения требований технологического регламента. А другие этапы связаны с аэрозольным состоянием пыли, когда пылевые частицы находятся во взвешенном в воздухе состоянии, и выделить их из аэрозоля с последующим возвратом в технологическое сырье либо не представляется возможным, либо вызывает значительные трудности.

Такое поэтапное рассмотрение процесса загрязнения воздушной среды явилось основой научного обоснования и описания процесса снижения загрязнения рассматриваемыми видами пыли воздушной среды предприятий строительной индустрии. При этом наблюдается четкое соответствие этапов процесса снижения загрязнения этапам процесса загрязнения атмосферы [8, 9]:

– первый этап: связывание образовавшихся в процессе обработки сырья на технологическом оборудовании частиц пыли;

– второй этап: задержание в зоне обрабатываемого сырья несвязавшихся частиц пыли из числа образовавшихся во внутреннем объеме производственного помещения;

– третий этап: улавливание пылевого аэрозоля, выделившегося во внутренний объем производственного помещения, с целью локализации (предотвращения распространения) пылевых частиц в заранее выделенной ограниченной зоне, их удаления из этой зоны, транспортировки в зону очистки;

– четвертый этап: очистка воздуха (дисперсионной среды) от пылевых частиц (дисперсной фазы) пылевого аэрозоля, уловленного и направляемого на выброс в приземный слой атмосферы путем их максимального разделения;

– пятый этап: рассеивание оставшегося после очистки количества пылевых частиц непосредственно перед выбросом их в приземный слой атмосферы путем интенсивного разудаления пылевых частиц при их выводе в атмосферу и ускоренном гравитационном высеве в заранее выделенной, строго ограниченной зоне на территории промышленной площадки, что обеспечивает дополнительное снижение концентрации пылевых частиц в приземном слое атмосферы до уровня $ПДК_{м.р.}$ ($ПДК_{с.с.}$).

Основная цель каждого этапа в процессе снижения загрязнения заключается в уменьшении устойчивости и в конечном счете разрушении пылевого аэрозоля как дисперсной системы с помощью заранее подготовленных по параметрам направленных на него внешних воздействий различной физической природы.

Проведенный авторами анализ позволил рассматривать процесс снижения загрязнения воздушной среды, реализуемый двумя основными циклами [8, 9]:

I цикл — снижение загрязнения технологического сырья (технологического оборудования), включающий в себя разработку нового или совершенствование действующего основного производственного оборудования и организацию технологических процессов, исключающих этапы образования и выделения загрязняющих веществ;

II цикл — снижение загрязнения воздуха, включающий в себя применение в действующем или проектируемом технологическом процессе дополнительных инженерно-технических устройств, конструкций, аппаратов, локализующих распространение пылевого аэрозоля и обеспечивающих его разрушение как дисперсной системы.

Необходимо учитывать, что мероприятия, которые относятся к первому циклу, зачастую не могут быть реализованы из-за нарушений требований, предъявляемых к сырью и технологическим процессам. Именно поэтому авторами положен в основу дальнейших исследований и разработок второй цикл процесса снижения загрязнения воздушной среды.

Таким образом, основная цель второго цикла процесса снижения загрязнения воздушной среды заключается в разрушении пылевого аэрозоля путем разделения дисперсной фазы (пылевых частиц) и дисперсионной среды (воздуха) за счет последовательной реализации этапов улавливания пыли, очистки воздуха от пыли и рассеивания пыли в атмосфере. Рассмотрим последовательно физические основы каждого из этапов II цикла.

В результате исследований авторами установлено, что физическая сущность процесса улавливания пыли заключается в целенаправленном воздействии на выделившийся пылевой аэрозоль заранее подготовленными по параметрам, либо дополнительной (Д–II.1) дисперсной системой, либо силовым полем, приводящим к образованию двух дисперсных систем [8, 10]:

– остаточной (О–II.1), в которой содержится минимальное количество (ориентированное на соблюдение ПДК$_{р.з}$) пылевых частиц как дисперсной фазы, и которая пространственно остается и распространяется во внутреннем объеме производственного помещения (воздухе рабочей зоны);

– промежуточной (П–II.1), в которой содержится максимальное количество уловленных и удаленных из зоны выделения пылевых частиц, и которая обладает повышенной устойчивостью в состоянии пылевого аэрозоля.

Дальнейшие исследования авторов позволили также раскрыть физическую сущность процесса очистки воздуха от пыли, которая заключается в целенаправленном воздействии на твердые частицы пылевого аэрозоля (промежуточная (П–II.1) дисперсная система) в активной зоне очистки после улавливания заранее подготовленными по параметрам либо дополнительной (Д–II.2) дисперсной системой, либо силовым полем, приводящим к образованию двух дисперсных систем [8, 10]:

– остаточной (О–II.2), в которой содержится максимальное количество пылевых частиц как дисперсной фазы, и которая обладает повышенной устойчивостью, перейдя в состояние пылевого материала и накапливаясь в специальных пылесборниках (накопителях);

– промежуточной (П–II.2), в которой содержится минимальное количество (ориентированное на соблюдение ПДК$_{м.р.}$ или ПДК$_{с.с}$) пылевых частиц как дисперсной фазы, и которая направляется на выброс в приземный слой атмосферы.

Дальнейшие исследования авторов позволили также раскрыть физическую сущность принудительного рассеивания оставшихся частиц пыли в приземном слое атмосферы, который реализуется в тех случаях, когда процесс очистки не позволяет достичь такой концентрации пыли в экологически значимых точках приземного слоя атмосферы, которая бы соответствовала ПДК$_{м.р.}$ (ПДС$_{с.с.}$). Так, физическая сущность процесса рассеивания пылевых частиц заключается в целенаправленном воздействии на твердые частицы пылевого аэрозоля (промежуточная (П–II.2) дисперсная система) в активной зоне рассеивания после очистки заранее подготовленными по параметрам, либо дополнительной (Д–II.3) дисперсной системой, либо силовым полем, приводящим к образованию двух дисперсных систем [8, 10]:

– остаточной (О–II.3), в которой содержится основное количество выбрасываемых пылевых частиц как дисперсной фазы, и которая в воздушном пространстве за пределами экологически значимых зон подвержена интенсивному осаждению на подстилающие поверхности, обладая повышенной устойчивостью при переходе в состояние пылевого материала;

– остаточной (О–II.4), в которой содержится минимальное количество (ориентированное на соблюдение ПДК$_{м.р.}$ или ПДК$_{с.с}$) пылевых частиц как дисперсной фазы, и которая остается витать в приземном слое атмосферы.

На основании выполненного анализа процесса снижения загрязнения воздушной среды различными видами строительной пыли авторами представлена блок-схема физической модели этого процесса с учетом рассмотренных выше двух циклов для условий реализации технологических процессов на предприятиях строительной индустрии (рис. 1) [8, 11, 12].

Наглядная иллюстрация блок-схемы физической модели снижения загрязнения воздушной среды позволяет заключить следующее. Во-первых, несмотря на ряд преимуществ I цикл процесса снижения загрязнения воздушной среды в реальных условиях организации технологического процесса на предприятиях строительной индустрии в подавляющем большинстве случаев не реализуем из-за нарушения технологических регламентов.

Во-вторых, в рамках II цикла этап улавливания определяет эффективность обеспечения санитарно-гигиенических норм в воздухе рабочих зон производственных помещений, в современных условиях организации технологических процессов на предприятиях строительной индустрии они обеспечены весьма эффективными и экономичными инженерными средствами (вытяжными устройствами, панелями и другими конструкциями).

В-третьих, в рамках II цикла этап принудительного рассеивания оставшихся частиц пыли в приземном слое атмосферы является вспомогательным для процесса очистки воздуха и применяется в весьма редких случаях.

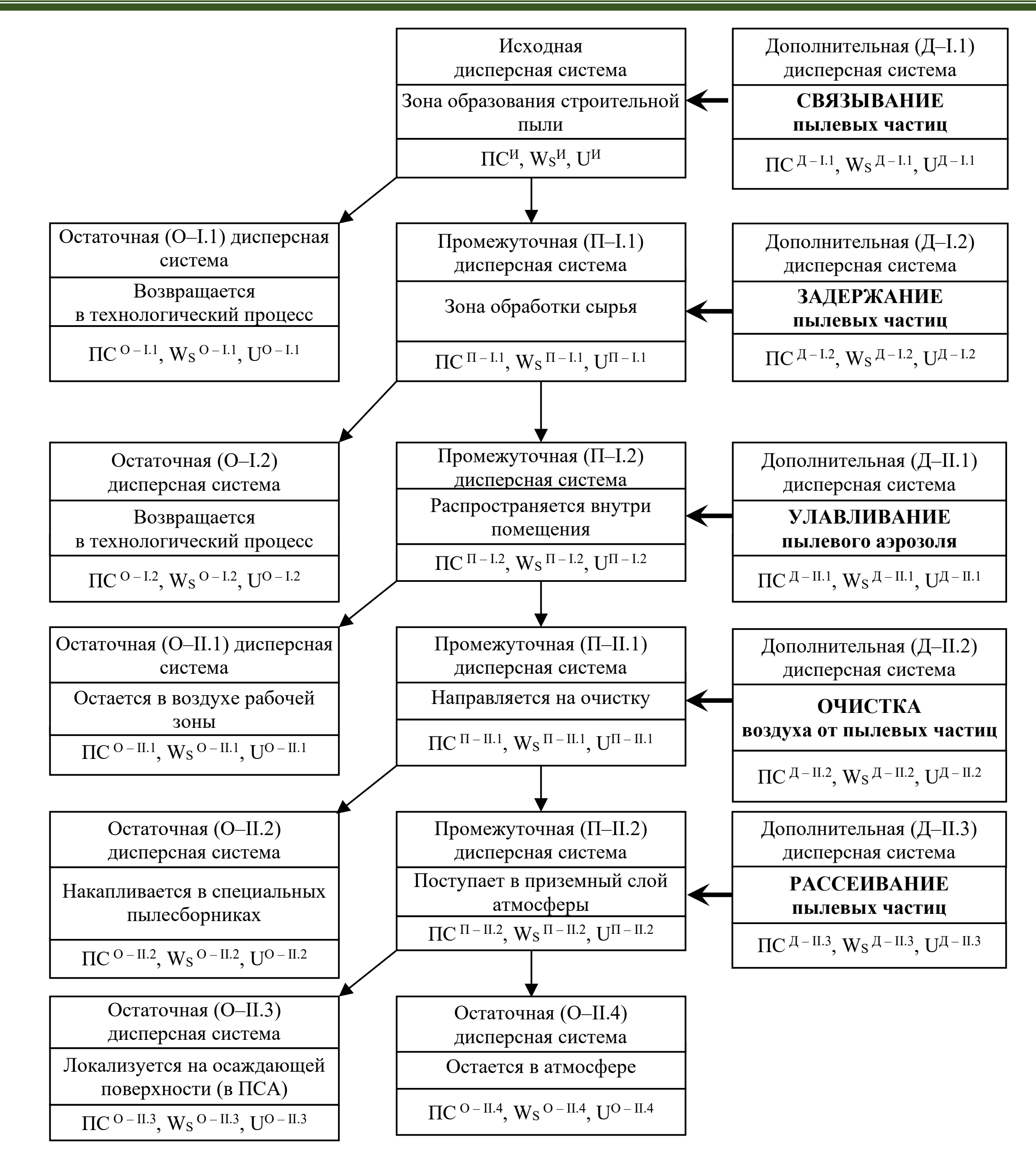
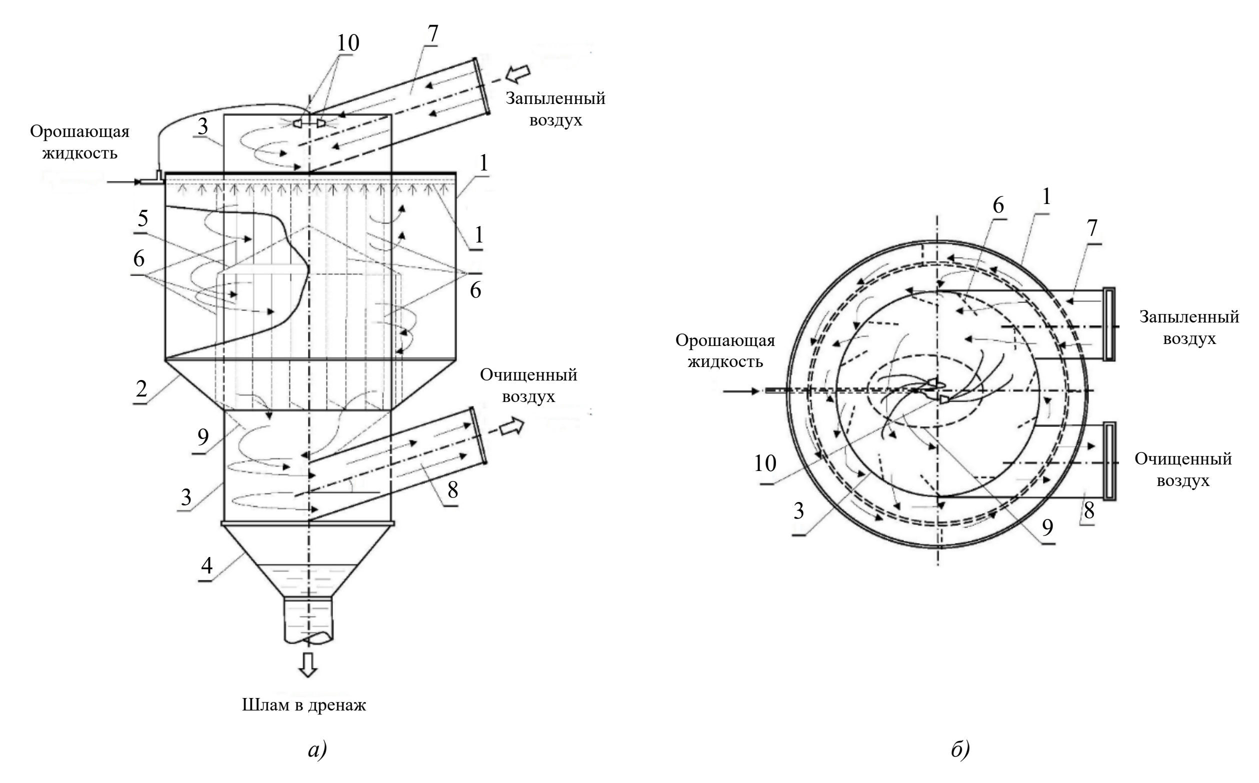


Рис. 1. Физическая модель процесса снижения загрязнения воздушной среды

Таким образом, авторами в основу практических разработок положен этап очистки воздуха от различных видов строительной пыли, для которого далеко не исчерпаны возможности повышения эффективности. Повышение эффективности средств очистки возможно на основе представленных выше результатов теоретических исследований и, в частности, блок-схемы физической модели снижения загрязнения воздушной среды [13–15].

Изучение особенностей поведения и свойств пылевого аэрозоля и направленных на него в процессе очистки внешних дисперсных систем либо силовых воздействий позволило авторам наметить основные направления, соответствующие им технологии и инженерные средства повышения эффективности процесса очистки. Одним из ярких представителей таких средств является разработанное авторами высокоэффективное и экономичное устройство, предназначенное для гидродинамической очистки вентиляционного воздуха (рис. 2).

Основной конструктивный элемент разработанного устройства — его цилиндрический корпус (1), который оканчивается коническим участком (2). Частично внутри и частично снаружи корпуса (1) расположена цилиндрическая камера (3), имеющая днище (4) в форме конуса. При этом камера (3) разделена сплошным полым конусом-отбойником (5) на две части: нижнюю и верхнюю. На внутренних боковых поверхностях этих частей расположены щелевые воздухозаборники (6). Входной тангенциальный наклонный патрубок (7) и выходной тангенциальный патрубок (8) присоединены к боковым поверхностям верхней и нижней частей камеры (3). Патрубок (7) в плане заходит в корпус (1) в верхней его части «против часовой стрелки», а патрубок (8) — в нижней его части «по часовой стрелке». При этом патрубки (7) и (8) обращены в одну сторону.



а) *б)*

Рис. 2. Устройство гидродинамической очистки вентиляционного воздуха от плохо смачиваемой слипающейся пыли, образующейся на предприятиях строительной индустрии: *а* — вид спереди; *б* — вид сверху

Упомянутые выше щелевые воздухозаборники (6) выполнены в виде прямоугольных щелевых отверстий. Причем в верхней части камеры (3) кромки щелевых воздухозаборников (6) отогнуты внутрь камеры (3), а в нижней части — наружу таким образом, чтобы и в верхней, и в нижней частях поток воздуха захватывался.

Нижняя часть камеры (3) оснащена конусом (9), который совмещен с коническим участком (2), а основание расположено по нижней кромке воздухозаборников (6). Система гидродинамической очистки в устройстве является трехступенчатой и включает в себя:

– две форсунки (10), которые тангенциально направлены по входящему потоку запыленного воздуха;

– кольцевой перфорированный трубопровод (11), установленный под верхней стенкой корпуса (1) в кольцевой полости между стенками корпуса (1) и камеры (3) с выходными отверстиями, направленными вертикально вниз;

– гидрофильтр, образованный сплошной жидкостной пленкой, стекающей с кромок конуса (9).

Принцип работы устройства заключается в следующем. Запыленный воздушный поток от технологического оборудования поступает во входной тангенциальный патрубок (7), а затем — во внутреннюю полость верхней части камеры (3) и спутно орошается каплями диспергированной жидкости, которые смачивают, связывают и удаляют из потока определенное количество пылевых частиц (первая ступень очистки) и которые формируются с помощью форсунок (10). В результате орошения получаемый шлам перемещается по камере (3) сверху вниз на конус-отбойник (5). А пылегазожидкостная смесь благодаря воздухозаборникам (6) с загнутыми внутрь кромками и установленному сплошному полому конусу-отбойнику (5) выводится из верхней части камеры (3) в кольцевую полость между ней и корпусом (1), попадая в плотную кольцевую капельно-жидкостную завесу, захватывающую также определенное количество пылевых частиц (вторая ступень очистки), формируемую кольцевой перфорированной трубой (11).

При этом, стекая с поверхности конуса-отбойника (5), шлам образует плотную кольцевую пленочную завесу (третья ступень очистки), которая смачивает и связывает значительную часть пылевых частиц. Пройдя эту завесу, остаточно запыленный поток захватывается отогнутыми наружу кромками воздухозаборника (6) в нижней части камеры (3) и возвращается во внутреннюю ее полость.

В конечном счете общий поток шлама из кольцевой полости между камерой (3) и корпусом (1) стекает по коническому участку (2) корпуса (1), а затем по конусу (9), образуя еще одну кольцевую пленочную завесу с различной толщиной пленки (четвертая ступень очистки), которая увеличивается в сторону выходного патрубка (8). Шлам выводится из устройства через коническое днище (4). Таким образом, пройдя последовательно четыре ступени очистки, максимально очищенный от частиц пыли воздушный поток выбрасывается в атмосферу через выходной патрубок (8). Все описанные выше конструктивные особенности разработанного устройства определяют его интегральную эффективность при очистке воздуха от пыли.

Для исследования диапазона изменений значений этой эффективности авторами был проведен ряд экспериментальных исследований в лабораторных условиях. В ходе их проводили измерения интегральной эффективности очистки воздуха от пыли с содержанием от 20 до 70 % SiO_2 (пыль песка, средний медианный диаметр пылевых частиц составлял 50 мкм, насыпная плотность пылевого материала — 1 860 кг/м^3, слабо слипающаяся с разрывной прочностью 200 Па, угол естественного откоса — 57 °, краевой угол смачивания — 10 °), изменяя конструкцию и параметры конуса-отбойника (5), а также конструкцию и расположение щелевых воздухозаборников (6). Результаты исследований приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Экспериментальные значения интегральной эффективности $E_{эф}$, %, очистки воздуха от пыли с содержанием от 20 до 70 % SiO_2 в зависимости от конструкции конуса-отбойника (5) и расположения щелевых воздухозаборников (6) при остальных оптимальных конструктивных решениях

Расположение щелевых воздухоза-борников (6) в верхней части камеры (3)	Конструкция конуса-отбойника (5)								
	Кромки конуса-отбойника совпадают со стенками камеры (3)			Кромки конуса-отбойника выступают за пределы камеры (3)			Кромки конуса-отбойника образуют зазор с внутренними стенками камеры (3)		
	кониче-ский	сфери-ческий	эллип-совид-ный	кониче-ский	сфери-ческий	эллип-совид-ный	кониче-ский	сфери-ческий	эллип-совид-ный
По всей высоте корпуса (1)	86,9	85,7	83,9	98,7	98,5	91,8	85,2	84,8	83,1
На верхней и нижней частях камеры (3) частично по высоте корпуса (1)	84,1	83,8	83,5	95,3	94,9	88,6	83,2	82,9	82,6

Таблица 2

Экспериментальные значения интегральной эффективности $E_{эф}$, %, очистки воздуха от пыли с содержанием от 20 до 70 % SiO2 в зависимости от конструкции щелевых воздухозаборников

Конструкция щелевых воздухозаборников (6) в плане		В верхней части камеры (3)	
		с отогнутыми наружу кромками по направлению потока	с отогнутыми внутрь кромками навстречу потоку
В нижней части камеры (3)	С отогнутыми наружу кромками	95,8	98,7
	С разведенными наружу кромками	93,4	97,2

Обсуждение и заключение. Анализ результатов экспериментальных исследований в лабораторных условиях позволяет сделать следующие выводы. Так, по данным таблицы 1 видно, что максимальное значение интегральной $E_{эф}$ с содержанием от 20 до 70 % SiO_2 составляет 98,7 % в том случае, когда щелевые воздухозаборники (6) расположены в верхней части камеры (3) по всей высоте корпуса (1).

По данным таблицы 2 видно, что это же максимальное значение интегральной $E_{эф}$ с содержанием от 20 до 70 % SiO_2, составляющее 98,7 %, обеспечивается тем, что в конструкции щелевых воздухозаборников (6) в плане в верхней части камеры (3) кромки отогнуты внутрь навстречу потоку, а в нижней части камеры (3) у щелевых воздухозаборников (6) кромки отогнуты наружу.

В заключение следует отметить, что повышение (до 96,5–98,7 %) $E_{эф}$ с содержанием от 20 до 70 % SiO_2 обеспечивается в предлагаемом устройстве за счет ряда конструктивных изменений, приводящих к интенсификации смачивания, связывания и удаления из воздуха пылевых частиц.

Так, например, установка форсунок (10) и кольцевой перфорированной трубы (11) повышает вероятность встречи и захвата частиц пыли каплями диспергированной жидкости. При этом аэродинамические характеристики пылегазожидкостного потока при спутном орошении поддерживаются постоянными.

Кроме того, коаксиально пропущенная через корпус (1) устройства цилиндрическая камера (3) способствует поддержанию равномерности распределения закрученного воздушного потока при его выходе из камеры (1) через щелевые воздухозаборники (6).

Конструктивное исполнение конуса-отбойника (5) позволяет равномерно распределять воздух, поступающий из объема камеры (3), что, в свою очередь, способствует образованию плотной завесы в виде кольцевой пленки, которая выполняет роль дополнительного очистного фильтра (третьей ступени очистки), установленного на пути закрученного в кольцевой полости пылегазожидкостного потока.

Последовательное перемещение пылевоздушного потока в полости устройства через все зоны очистки воздуха от пыли обеспечивают воздухозаборники (6). При этом форма и расположение кромок щелей позволяют стабилизировать аэродинамику в полости устройства.

Кроме того, дополнительный вклад в повышение эффективности вносит конус (9), форма и расположение которого создают дополнительную кольцевую пленочную завесу с различной толщиной пленки (четвертая ступень очистки), она создается на пути потока воздуха за счет стекания шлама с кромок меньшего основания конуса (9) и увеличивается по толщине в сторону выходного патрубка (8). Также конструкция конуса (9) обеспечивает отвод шлама из устройства в зоне удаления очищенного воздуха при значительном снижении брызгоуноса в выходной патрубок (8). При этом уклон выходного патрубка (8) способствует снижению брызгоуноса.

Необходимо отметить, что для обеспечения стабильной, надежной и всесезонной эксплуатации устройства в качестве орошающей жидкости необходимо использовать водные растворы, не замерзающие даже при отрицательных значениях температуры окружающего воздуха. В случае использования воды устройство необходимо содержать в закрытых отапливаемых помещениях.

В заключение следует отметить, что разработанное устройство очистки воздуха от пыли со всеми описанными выше конструктивными особенностями обеспечивает требуемую интегральную эффективность, за счет высоких значений (96,5–98,7 %) которой, в свою очередь, соблюдаются нормативные экологические требования к качеству воздуха приземного слоя атмосферы.

Таким образом, в результате выполненных исследований достигнута конечная цель — определена возможность повышения экологической безопасности территорий промышленных площадок предприятий стройиндустрии и прилегающих селитебных зон путем разработки и применения высокоэффективных (не менее 96,0 %) современных технологий и средств пылеподавления, к числу которых относится предложенное авторами устройство очистки воздуха от пыли с содержанием от 20 до 70 % SiO_2.

Список литературы / References

1. Покотило В.Э., Стрежнев Д.О., Толмачёва Л.В. Исследование химических загрязнений окружающей среды. В: *Сборник статей и тезисов докладов IV международной междисциплинарной конференции «Достижения современной науки и образования». Ставрополь. 2018*. Таганрог: ЭльДирект; 2018. С. 59–61.

Pokotilo VE, Strezhnev DO, Tolmacheva LV. Study of Chemical Pollution of the Environment. In: *Achievements of modern science and education. Collection of articles and abstracts of the IV International Interdisciplinary Conference. Stavropol. 2018*. Taganrog: El'Direkt; 2018. P. 59–61. (In Russ.)

2. Андреева Е.В., Кладо Т.Н. *Атмосфера и жизнь.* Ленинград: Гидрометеорологическое издательство; 1963. 268 с.

Andreeva EV, Klado TN. *Atmosphere and Life.* Leningrad: Hydrometeorological Publishing House; 1963. 268 p. (In Russ.)

3. Кулагина Т.А., Андруняк И.В. *Технологические процессы и загрязняющие выбросы*. Красноярск: Сибирский федеральный университет; 2019. 206 с.

Kulagina TA, Andrunyak IV. *Technological Processes and Polluting Emissions*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2019. 206 p. (In Russ.)

4. Малашкина А.В. Факторы оценки влияния промышленных городов на здоровье населения. В: *Труды I Национальной научно-практической конференции с международным участием «Инновации природообустройства и защиты окружающей среды».* Саратов: Издательство «КУБиК»; 2019. С. 196–199.

Malashkina AV. Factors for Assessing the Impact of Industrial Cities on Public Health. In: *Proceedings of the 1st National Scientific and Practical Conference with international participation "Innovations in environmental management and environmental protection".* Saratov: KUBiK Publishing House; 2019. PC. 196–199. (In Russ.)

5. Lysova E., Paramonova O., Samarskaya N., Gyrova O., Tsarevskaya I. Application of Physical and Energetic Approach to Estimation and Selection of Atmospheric Protection Systems for Energetic Devices. *MATEC Web of Conferences.* 2018;170:04013. https://doi.org/10.1051/matecconf/201817004013

6. Momei Qin, Murphy BN, Isaacs KK, McDonald BC, Quanyang Lu, McKeen SA, et al. Criteria Pollutant Impacts of Volatile Chemical Products Informed by Near-Field Modelling. *Nature Sustainability.* 2021;4(2):129–137. https://doi.org/10.1038/s41893-020-00614-1

7. Халиков И.С. Идентификация источников загрязнения объектов природной среды полициклическими ароматическими углеводородами с использованием молекулярных соотношений. *Экологическая химия.* 2018;27(2):76–85.

Khalikov IS. Identification of Natural Objects Contamination by Polycyclic Aromatic Hydrocarbons with the Use of Molecular Relations. *Ekologicheskaya khimiya.* 2018;27(2):76–85. (In Russ.)

8. Bespalov V, Gurova O, Samarskaya N, Paramonova O. Classification of Air Pollution Criteria for the Improvement of Methodical Approaches to Ensure the Environmental Safety of Major Cities. *E3S Web of Conferences.* 2019;135:01033. https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913501033 (accessed: 04.05.2024).

9. Palliyarayil A, Saini H, Vinayakumar K, Selvarajan P, Vinu A, Kumar NS, et al. Advances in porous material research towards the management of air pollution. *Emergent Materials.* 2021;4:607–643. https://doi.org/10.1007/s42247-020-00151-9

10. Садунишвили Т.А., Хатисашвили Г.А., Гурова О.С., Самарская Н.С. *Глобальные экологические проблемы и биотехнологический подход.* Монография. Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет; 2021. 146 с.

Sadunishvili TA, Khatisashvili GA, Gurova OS, Samarskaya NS. *Global Environmental Issues and Biotechnological Approach.* Monograph. Rostov-on-Don: Don State Technical University; 2021. 146 p. (In Russ.)

11. Samarskaya N, Paramonova O, Lysova E. Study of the Air Pollution Reduction Process in the Production of Film-Forming Substances for Quick-Drying Enamels. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2021;666:042072 http://doi.org/10.1088/1755-1315/666/4/042072

12. Bespalov V, Gurova O. Development of an Integrated Approach to the Selection of Remediation Measures and Environmental Technologies for their Implementation. *E3S Web of Conferences*. 2021;258:08027. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125808027

13. Samarskaya N, Gyrova O. Analysis of the Results of Theoretical Calculations Based on the Methodology for Making a Decision on the Choice of Optimal Technologies for Dedusting with Foam. *AIP Conference Proceedings.* 2022;2503(1):040004. https://doi.org/10.1063/5.0099703

14. Bespalov VI, Gurova OS. Scientific Substantiation of New Concept for Environmental Technologies Choice. *AIP Conference Proceedings.* 2022;2503(1):040005. https://doi.org/10.1063/5.0099700

15. Беспалов В.И., Лысова Е.П., Парамонова О.Н., Самарская Н.С. Обоснование выбора научного подхода для формирования максимально эффективных способов и средств снижения загрязнения воздушной среды при эксплуатации энергетических установок. *Инженерный вестник Дона.* 2018;(3). URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_42_Bespalov_Lysova.pdf_c86775c35f.pdf (дата обращения: 04.05.2024).

Bespalov VI, Lysova EP, Paramonova ON, Samarskaya NS. Justification of the Scientific Approach Choice for Formation of the Most Effective Ways and Means of Reducing Air Pollution in the Operation of Power Plants. *Engineering journal of Don.* 2018;(3). URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_42_Bespalov_Lysova.pdf_c86775c35f.pdf (accessed: 04.05.2024). (In Russ.)

Об авторах:

Вадим Игоревич Беспалов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной защиты окружающей среды Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 6778-4627, ORCID, ResearcherID, ScopusID, izos-rgsu@mail.ru

Оксана Сергеевна Гурова, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры инженерной защиты окружающей среды Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 1852-507, ORCID, ResearcherID, ScopusID, okgurova@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

В.И. Беспалов: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, научное руководство.

О.С. Гурова: анализ результатов исследований, корректировка выводов, графическое оформление, доработка текста.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Vadim I. Bespalov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Environmental Engineering Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code: 6778-4627, ORCID, ResearcherID, ScopusID, izos-rgsu@mail.ru

Oksana S. Gurova, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Environmental Engineering Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code: 1852-507, ORCID, ResearcherID, ScopusID, okgurova@yandex.ru

Claimed Contributorship:

VI Bespalov: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study, academic advising.

OS Gurova: research results analysis, conclusions correction, graphic design, text revision.

Conflict of Interest Statement: **the authors do not have any conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 13.06.2024
Поступила после рецензирования / Revised 07.07.2024
Принята к публикации / Accepted 15.07.2024

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY




УДК 614.8.084 *Оригинальное эмпирическое исследование*
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-29-38

Совершенствование системы профилактики травматизма на основе конвергентных технологий цифрового управления обеспечением работников средствами индивидуальной защиты


EDN: AGDEEN

В.А. Петрова ✉, **Е.В. Климова**, **А.Ю. Семейкин**, **О.Н. Томаровщенко**
Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация
 lezhand@mail.ru

Аннотация
Введение. Внедрение высокотехнологичного оборудования и специализированных программных средств позволяет повысить качество выполнения трудовых операций без привлечения дополнительного рабочего контингента, что способствует рациональному использованию времени и ресурсов. В результате реализации данного подхода достигается предотвращение возможных ошибок и задержек, связанных с человеческим фактором. Путем интеграции цифровых технологий возможно не только упростить управленческие процедуры, но и снизить уровень производственного травматизма и инцидентность за счет мониторинга соблюдения требований по использованию персоналом средств индивидуальной защиты в режиме реального времени. В данной работе была поставлена цель определить возможности совершенствования системы профилактики микротравматизма путем внедрения комплексных решений по учету выдачи средств индивидуальной защиты с использованием программных средств.
Материалы и методы. В работе использованы базирующиеся на требованиях законодательной и нормативно-правовой базы РФ методы и технологии учета и выдачи средств индивидуальной защиты с целью определения их эффективности и применимости с учетом отраслевых особенностей предприятий. Для оценки потребности в улучшении применяемых средств индивидуальной защиты была разработана анкета. Анкетирование проводилось среди работников строительной организации Белгородской области в форме чек-листа, в котором необходимо было отметить недостатки системы управления охраной труда (СУОТ) в области выдачи средств индивидуальной защиты (СИЗ).
Результаты исследования. Результаты обработки заполненных анкет респондентов, участвующих в исследовании, свидетельствуют о важности перехода к цифровому формату учета и выдачи СИЗ с целью повышения эффективности и оперативности обеспечения работников необходимыми средствами индивидуальной защиты. Проведенный патентный поиск позволил выявить основные недостатки существующих методов и систем выдачи СИЗ, устранение которых позволит повысить надежность процесса обеспечения персонала защитными средствами, что указывает на актуальность дальнейших исследований в данной области. Разработана модель по улучшению системы обеспечения сотрудников строительных организаций средствами индивидуальной защиты путем внедрения программного комплекса «СтройКонтроль+» по автоматизации процессов учета и выдачи этих средств. Данное программное решение предполагает интеграцию с существующими информационными системами предприятия и может быть адаптировано под конкретные потребности и требования организации. Разработанная модель предусматривает использование средств мониторинга для отслеживания необходимости замены средств индивидуальной защиты с последующим формированием отчетной документации, что способствует повышению уровня безопасности и сохранению здоровья работников в условиях воздействия на них вредных и опасных производственных факторов.
Обсуждение и заключение. Внедрение программного комплекса «СтройКонтроль+» позволило сократить уровень микротравмирования работников строительных организаций по причинам неправильного применения ими средств индивидуальной защиты, отсутствия у них необходимых СИЗ, недостаточных знаний в области использования подобных средств. Кроме того, подчеркивают авторы, необходимо не только фиксировать заявки

от работников на получение определенных средств защиты или выявленные нарушения, но и уменьшить период реагирования ответственных лиц на необходимость замены неисправных средств индивидуальной защиты.

Ключевые слова: охрана труда, производственный травматизм, средства индивидуальной защиты, анкетирование, программное обеспечение по учету и выдачи средств индивидуальной защиты

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакционной коллегии журнала и рецензенту за профессиональный анализ и рекомендации по корректировке статьи.

Финансирование. Работа выполнена в рамках программы «Приоритет-2030» на базе Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ имени В.Г. Шухова.

Для цитирования. Петрова В.А., Климова Е.В., Семейкин А.Ю., Томаровщенко О.Н. Совершенствование системы профилактики травматизма на основе конвергентных технологий цифрового управления обеспечением работников средствами индивидуальной защиты. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(3):29–38. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-29-38

Original Empirical Research

Improving the Injury Prevention System Based on Convergent Digital Management Technologies to Provide Employees with Personal Protective Equipment

Viktoriya A. Petrova ✉, **Elena V. Klimova**, **Alexander Yu. Semeykin**, **Oksana N. Tomarovshchenko**
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation
✉ lezhand@mail.ru

Abstract

Introduction. The introduction of high-tech equipment and specialized software makes it possible to improve the quality of labor operations without attracting additional labor, which contributes to the rational use of time and resources. As a result of the implementation of this approach, the prevention of possible errors and delays caused by the human factor is achieved. By integrating digital technologies, it is possible not only to simplify management procedures, but also to reduce the level of occupational injuries and incidents by monitoring the compliance with the requirements for the use of personal protective equipment by personnel in real time. This work aims to reduce the level of occupational injuries by improving the micro-trauma prevention system and implementing integrated solutions for accounting for the issuance of personal protective equipment using software tools.

Materials and Methods. The paper examined the existing methods and technologies for accounting and issuing personal protective equipment in order to determine their effectiveness and applicability, taking into account the industry characteristics of enterprises based on the requirements of the legislative and regulatory framework of the Russian Federation. A questionnaire was developed to assess the need to improve the personal protective equipment used among employees of a construction organization in the Belgorod region. The survey of employees was conducted in the form of a checklist, where it was necessary to note the shortcomings and inconsistencies of the occupational health management system (OHMS) in the field of issuing PPE.

Results. The results of analyzing the completed questionnaires from the respondents who participated in the study suggested the importance of transitioning to a digital format for managing and issuing PPE in order to enhance the efficiency and effectiveness of providing employees with necessary personal protective equipment. The patent search conducted revealed the primary flaws in current methods and systems for distributing PPE, addressing which would enhance the reliability of the procedure for equipping personnel with protective equipment, indicating the significance of further research in this field. A model has been developed to improve the system for providing employees of construction companies with personal protective equipment by implementing the StroyKontrol+ software package to automate the accounting and issuance of these resources. This software solution integrated with the existing enterprise information systems and could be customized to meet the specific needs of an organization. The model included the use of monitoring tools to identify the need for replacing personal protective equipment and the creation of accounting documents to help increase safety and protect workers from harmful and dangerous industrial factors.

Discussion and Conclusion. The introduction of the Stroykontrol+ software package has made it possible to reduce the level of micro-trauma among construction workers due to their improper use of PPE, lack of necessary PPE and insufficient knowledge on how to use these tools. In addition, the authors emphasize, it is necessary not only to record applications from employees for certain protective equipment or violations identified, but also to reduce the time response of responsible parties when it comes to replacing defective personal protective equipment.

Keywords: occupational safety, industrial injuries, personal protective equipment, questionnaires, software for accounting and issuing personal protective equipment

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial team of the Journal and anonymous reviewers for their competent expertise and valuable recommendations for improving the quality of the article.

Funding Information. The research was done within the framework of the Priority 2030 program at the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov using equipment from the High Technology Center of V.G. Shukhov BSTU.

For citation. Petrova VA, Klimova EV, Semeykin AYu, Tomarovshchenko ON. Improving the Injury Prevention System Based on Convergent Digital Management Technologies to Provide Employees with Personal Protective Equipment. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(3):29–38. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-29-38

Введение. Применение средств индивидуальной защиты является одним из наиболее надежных способов обеспечения безопасности профессиональной деятельности и защиты работников от воздействия вредных и опасных факторов. В рамках реализации государственной концепции по устойчивой интеграции риск-ориентированного подхода в охрану труда осуществляется внедрение систематической оценки рисков с учетом специфики производственного процесса, особенностей рабочего места и потенциальных опасностей, сопровождающих выполнение работником трудовых операций, а также последующая разработка соответствующих мер безопасности. Важным шагом в этом направлении является переход на единые типовые нормы (ЕТН) выдачи средств индивидуальной защиты, который предполагает замену традиционного метода выдачи СИЗ в зависимости от профессии работника на выдачу, основанную на результатах специальной оценки условий труда и профессиональных рисков. Правильно подобранные и эффективно используемые средства индивидуальной защиты способствуют снижению риска возникновения профессиональных заболеваний и несчастных случаев, а также повышению производительности труда и улучшению состояния здоровья персонала [1, 2].

Одним из ключевых элементов системы стратегического управления безопасностью труда персонала является качественная подготовка работников. Проведение обучающих мероприятий, направленных на закрепление теоретических знаний и практическую отработку навыков использования (применения) средств индивидуальной защиты, является определяющим критерием эффективности мероприятий по предотвращению производственного травматизма, профзаболеваний и устранению их последствий. Правовая основа регулирования вопросов по использованию и выдаче средств индивидуальной защиты работникам в Российской Федерации базируется на комплексе нормативно-правовых актов. В частности, ключевыми документами, определяющими критерии и процедуры использования СИЗ, являются приказы Минтруда РФ № 767Н[1] и № 766Н[2]. Также существуют нормативные акты, которые устанавливают обязательные требования к качеству, сертификации и гарантии безопасности при использовании СИЗ [3, 4].

Актуальным направлением реализации трудоохранного менеджмента является повышение уровня культуры безопасности на рабочих местах, внедрение которого позволяет обеспечить эффективность процессов применения и использования СИЗ персоналом. Выполнение этих задач требует комплексного подхода, включающего в себя обучение и информирование работников о первостепенности соблюдения требований охраны труда, промышленной и производственной безопасности, активное участие персонала в процессе выбора и тестирования СИЗ, регулярный анализ результативности и совершенствование СУОТ. В рамках данной работы авторами была поставлена цель разработать пути снижения количественных показателей производственного микротравматизма путем совершенствования системы профилактики микротравмирования персонала в строительных организациях при внедрении разработанных комплексных решений по учету выдачи СИЗ с применением цифровых технологий.

Материалы и методы. В работе использованы базирующиеся на требованиях законодательной и нормативно-правовой базы РФ методы и технологии учета и выдачи средств индивидуальной защиты с целью определения их эффективности с учетом отраслевых особенностей предприятий. Для оценки применяемых средств индивидуальной защиты для работников строительной организации Белгородской области была разработана анкета, в основу которой положена методика оценки эффективности СИЗ, представленная в Федеральном законе № 426-ФЗ[3], а также были учтены показатели, отражающие степень соответствия СИЗ нормативным требованиям по обеспечению работников средствами защиты (таблица 1).

[1] *Об утверждении единых типовых норм выдачи средств индивидуальной защиты и смывающих средств.* Приказ Минтруда РФ № 767Н от 29.10.2021. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_405226/ (дата обращения: 14.05.2024).

[2] *Об утверждении Правил обеспечения работников средствами индивидуальной защиты и смывающими средствами.* Приказ Минтруда РФ № 766Н от 29.10.2021. URL: https://docs.cntd.ru/document/727092798 (дата обращения: 14.05.2024).

[3] *О специальной оценке условий труда.* Федеральный закон РФ № 426-ФЗ от 28.12.2013. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_156555/ (дата обращения: 14.05.2024).

Таблица 1

Анкета, предлагаемая респондентам строительной организации Белгородской области

№ п/п	Содержание вопроса	Варианты ответа*	
		Да	Нет
1	При трудоустройстве на текущую должность предоставлялись ли Вам средства индивидуальной защиты (СИЗ)?		
2	При первичной выдаче средств индивидуальной защиты удовлетворяли ли Вас все аспекты: размеры, качество и внешний вид?		
3	Соответствуют ли реальным условиям труда ассортимент и количество выданных СИЗ?		
4	Удовлетворяют ли Вас качество и другие технические характеристики выдаваемых Вам организацией средств индивидуальной защиты?		
5	Соответствуют ли фактические сроки использования СИЗ на предприятии установленным нормам?		
6	Ознакомлены ли Вы с картой специальной оценки условий труда Вашего рабочего места?		
7	Была ли составлена личная карточка сотрудника, на которой отражены все выданные Вам средства индивидуальной защиты?		
8	Вы удовлетворены результатами замены и обновления средств индивидуальной защиты? В случае отрицательного ответа укажите причину на оборотной стороне анкеты.		
9	Успевают ли Вам заменить непригодное СИЗ в сроки перед новой сменой? Если нет, прошу указать на обратной стороне анкеты, как долго Вы ожидали замену СИЗ.		
10	Имеются ли предложения по улучшению системы выдачи средств индивидуальной защиты и инструкций по охране труда? В случае положительного ответа просим указать их на оборотной стороне анкеты.		

Сбор статистических данных проведен посредством анкетирования сотрудников. Оно было направлено на получение прямой информации от участников трудового процесса с целью оценки текущего уровня обеспеченности средствами защиты и выявления проблемных аспектов, требующих доработки и улучшений. Выбор средств индивидуальной защиты, которые соответствуют предпочтениям и комфортны для использования, может повысить степень их принятия работниками, что важно для мотивационного регулирования в области обеспечения безопасности профессиональной деятельности.

В современных условиях технологического развития отмечается значительный рост количества компьютерных программ по обеспечению автоматизации и безопасности рабочих процессов, повышению производительности труда [5, 6]. В качестве примера успешного выхода на рынок и применения цифровых технологий в производственной практике авторы рассматривают специализированные системы дистрибуции средств индивидуальной защиты — автоматические выдающие устройства (вендинговые аппараты) на базе крупного холдинга — ГК «Восток-Сервис». Вендинговый аппарат, модель 540 (выдает СИЗ с коротким сроком использования); вендинговый аппарат, модель 34 (выдает крупногабаритные СИЗ); аппарат по приему СИЗ в стирку, модель 640 (оборудован тележкой с колесиками или прочным мешком, в который можно загрузить до 40 единиц спецодежды); накопитель отработанных СИЗ, модель 140 (устройство для раздельной утилизации различной номенклатуры изделий, состоящее из секций с сенсорным экраном); киоск информационный, модель 740 (информационный киоск, через который сотрудник сможет зайти в личный кабинет и узнать о положенных ему СИЗ, одежде в стирке или сроках годности спецодежды).

Анализ перспективных научных направлений в области цифровизации процессов учёта и выдачи средств индивидуальной защиты был проведён на основе исследования патентных и технических информационных ресурсов [7, 8]. Актуальность разработки цифровых решений в этой сфере подтверждается ежегодным увеличением количества зарегистрированных полезных моделей и изобретений, что видно по данным, представленным на цифровой платформе Федеральной службы по интеллектуальной собственности. В качестве примеров можно выделить следующие разработки: полезная модель к патенту RU165544U1 «Автомат для выдачи и контроля учёта средств индивидуальной защиты (СИЗ)»; полезная модель к патенту RU183254U1 «Устройство для хранения и выдачи средств индивидуальной защиты и инструментов»; патент на изобретение RU2742980C1 «Контейнер для сбора и обеззараживания использованных средств индивидуальной защиты».

На предприятиях широкое распространение получили вендинговые аппараты, которые находятся территориально на стройплощадке и имеют в достатке все необходимые СИЗ. Но важной проблемой остается интеграция данного аппарата с корпоративным обеспечением и электронным учетом СИЗ. Например, вендинговые аппараты, которые предлагает ГК «Восток-Сервис», имеют свою информационную систему, связь с которой осуществляется через интернет, а он не всегда может быть в отдаленных местах стройки. Программное обеспечение аппарата можно интегрировать в систему предприятия (1С, SAP), что очень удобно, если данные системы внедрены в организации. На стройплощадках лучше использовать программное обеспечение в «облаке», это позволит вести учет каждого выданного СИЗ в режиме реального времени. Всем сотрудникам будут выданы пластиковые RFID-карты, по которым система будет их идентифицировать и вести учет выданных им средств индивидуальной защиты. Главным преимуществом данных аппаратов является то, что ГК «Восток-Сервис» как поставщик обеспечивает всеми необходимыми СИЗ сразу.

Анализ запатентованных полезных моделей и изобретений показал, что данные автоматы или контейнеры не могут быть синхронизированы с информационными системами предприятий, что является существенным недостатком [9, 10].

В настоящее время в большинстве случаев используется традиционная система обеспечения работников средствами индивидуальной защиты, при которой СИЗ закупаются заранее, поступают на склад и передаются сотрудникам по мере их запроса. Однако эта система характеризуется ограниченностью в выборе и однотипностью предоставляемых видов СИЗ, что замедляет процесс приобретения новых типов СИЗ, их оперативной доставки на рабочие места и адаптации под конкретные рабочие условия [11, 12].

Материалом для исследования явились результаты опроса работников по разработанной анкете, а также статистические данные из журналов учета микроповреждений (микротравм) работников. По результатам опроса сотрудников выявлены проблемы в обеспеченности средствами индивидуальной защиты и неправильном их применении при выполнении работ, что подтверждается данными отчетной документации по регистрации микротравм.

Для сокращения количества микротравмирования работников в строительной отрасли по причинам неправильного применения СИЗ, отсутствия необходимых средств защиты, недостаточного уровня знаний по их использованию было принято решение изменить процесс выдачи средств индивидуальной защиты работникам путем внедрения цифрового продукта для смартфонов «СтройКонтроль+» (рис. 1)

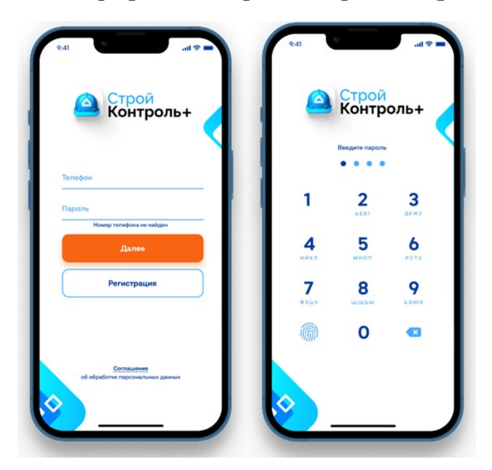


Рис. 1. Модуль регистрации и аутентификации пользователей в приложении «СтройКонтроль+»

Для трудоустроенного сотрудника организации требуется установка данного приложения на мобильное устройство, после чего учетная запись будет зарегистрирована специалистом по охране труда. Учетная запись должна быть привязана к номеру телефона работника, что минимизирует риски утечки персональных данных и цифрового взлома, предотвращает использование приложения неавторизованными лицами. Такая методика верификации широко применяется в различных цифровых приложениях и продемонстрировала высокую эффективность.

Приложение предоставляет сотрудникам возможность прохождения как обязательных, так и добровольных тестов. Для использования этой функции необходимо ознакомиться с интерфейсом программы. Важным ее разделом является встроенный чат, который позволяет руководителям и сотрудникам обмениваться информацией в рабочее время. Этот чат служит для оперативного решения производственных вопросов и проблем. Использование чат-связи способствует эффективному обмену информацией о возникших проблемах и потребностях в ходе работы, а также позволяет руководителям своевременно получать уведомления на смартфоны о нехватке средств индивидуальной защиты, что ускоряет их поставку на объект (рис. 2).

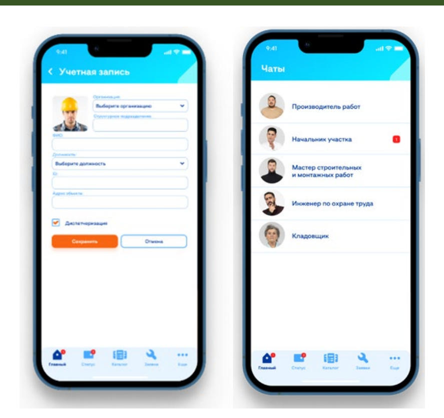


Рис. 2. Дизайн личного кабинета и представление списка диалоговых каналов

Раздел приложения по оповещению руководителей и других ответственных лиц о проблемах в использовании средств индивидуальной защиты будет создан для решения вопросов, связанных с их заменой по причине технических неполадок. Внедрение данного раздела позволит сократить время решения проблемы на 35 %, так как здесь происходит обработка информации в максимально короткие сроки, а принятие решения — за несколько секунд. Указанный раздел может быть полезен для сотрудников благодаря удобному способу списания средств индивидуальной защиты (рис. 3).

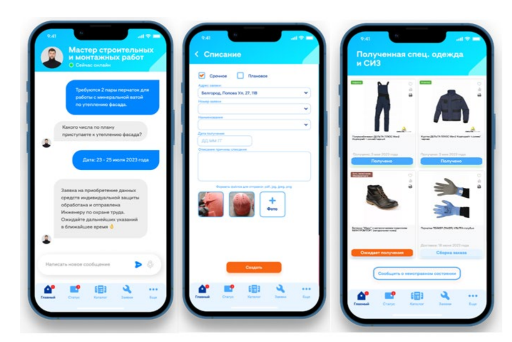


Рис. 3. Оформление экрана для операций по получению и контролю наличия СИЗ

Внедрение мобильного приложения значительно улучшило процесс выдачи средств индивидуальной защиты в строительной отрасли, обеспечило более удобную и прозрачную систему контроля и использования СИЗ. Приложение предоставляет работникам удобный способ получения необходимых средств защиты, а также обеспечивает эффективное управление запасами и обработку заявок со стороны работодателей и уполномоченных лиц, что способствует повышению уровня безопасности и сокращению времени, затрачиваемого на процесс выдачи СИЗ. Кроме того, данное приложение дает возможность проводить более точный учет предоставленных средств индивидуальной защиты, оно помогает также контролировать запасы и предотвращать возможные проблемы с недостатком средств защиты. Использование мобильных приложений для улучшения безопасности и информированности персонала способствует увеличению общей культуры безопасности и осведомленности работников. Приложение включает в себя инструкции по использованию средств индивидуальной защиты, а также образовательные материалы, видеоролики и руководства по безопасному применению этих средств, что способствует снижению риска травм и несчастных случаев на рабочем месте.

Результаты исследования. Важной задачей работодателя является обеспечение работников строительных организаций средствами индивидуальной защиты, которые будут гарантировать безопасность и сохранность здоровья на рабочем месте [13]. Классический метод выдачи СИЗ включает в себя приобретение средств защиты у поставщиков или в магазинах и выдачу непосредственно на рабочем месте [14] с последующим обучением работников безопасной эксплуатации для снижения риска возникновения несчастных случаев и потенциальной опасности на строительной площадке.

Респондентами анкетирования стали 300 работников строительной организации Белгородской области, среди них мастер строительных и монтажных работ, машинист грузоподъемных механизмов, каменщик, плотник, электрогазосварщик, машинист башенного крана, штукатур-маляр, плиточник, сварщик, электромонтажник и другие. Рабочий график респондентов — 5/2 (восьмичасовой рабочий день). 80 % опрошенных мужского пола, 85 % имеют среднее профессиональное образование, средний возраст — 40–55 лет, рабочий стаж — более 10 лет.

Результаты анкетирования работников строительной организации Белгородской области показали, что 80 % из них при трудоустройстве на занимаемую должность были обеспечены необходимыми средствами индивиду-

альной защиты в требуемых количестве, размере, качестве и предназначении. Средства защиты получались у кладовщиков с обязательным учетом и заполнением личных карточек СИЗ.

Для получения допуска к самостоятельной работе сотрудники проходят вводный инструктаж по охране труда и инструктаж по охране труда на рабочем месте [15], где им рассказывают о картах специальной оценки условий труда и оценки профессиональных рисков. По результатам проведенного анкетирования было установлено, что около 70 % работников не были удовлетворены результатами проведения замены и обновления СИЗ вследствие длительности процесса. В примечании работники указывали, что не могли месяцами поменять непригодные средства защиты. Проанализировав анкеты респондентов, можно выделить несколько причин несвоевременной замены средств индивидуальной защиты: географическая удаленность склада от строительной площадки, недостаток необходимых средств защиты, присутствие посредников между работником и кладовщиком. Все это замедляет процесс замены средств индивидуальной защиты. Такие проблемы повышают риск возникновения травм и профессиональных заболеваний.

Проблема микротравматизма у работников в значительной степени обусловлена неприменением ими средств индивидуальной защиты, что вызвано рядом причин, включая игнорирование необходимости использования СИЗ, формальное проведение обучения по применению, неправильное их использование, несвоевременные замена и обновление, что подтверждено статистическими данными, собранными на основе документации по учету и регистрации микроповреждений за 2022–2023 гг. в строительных организациях Белгородской области (рис. 4).

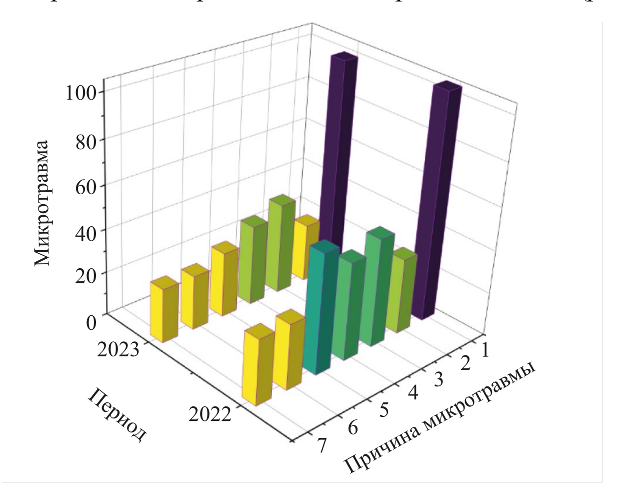


Рис. 4. Распределение видов микротравм среди работников строительных организаций по причинам их возникновения за 2022 и 2023 гг.: 1 — утомление, физическое перенапряжение; 2 — игнорирование работником применение СИЗ; 3 — неправильное применение работником СИЗ; 4 — недостаток знаний у работника об использовании (применении) СИЗ; 5 — отсутствие у работника необходимых СИЗ; 6 — выполнение работ, не предусмотренных должностными обязанностями; 7 — неудовлетворительное состояние напольных покрытий, неровные, скользкие, проваленные полы

Установлено, что за 2022 год было зафиксировано 350 микротравм, после внедрения разработанного цифрового продукта для смартфонов «СтройКонтроль+» за 2023 год наблюдается снижение количества микротравмирования на 64 случая, в том числе по следующим причинам: игнорирование работником применения СИЗ, неправильное применение работником СИЗ, недостаток знаний у работника по использованию (применению) СИЗ, отсутствие у работника необходимых СИЗ.

Обсуждение и заключение. В рамках осуществления строительной деятельности на территории Белгородской области применяются различные подходы к обеспечению персонала средствами индивидуальной защиты. Наблюдается как использование классической системы выдачи СИЗ, так и применение гибридной модели, предполагающей отсутствие термина «склад» и передачу функций поставки и хранения на инженера-техника.

Распределение СИЗ осуществляется по мере необходимости, определяемой с учетом степени выполнения работ. Наиболее частая проблема, с которой сталкиваются строительные организации — недопоставка СИЗ, обусловленная следующими сопутствующими факторами: неэффективное планирование и управление запасами вследствие отсутствия систематического анализа потребности в СИЗ, несовершенства систем заказа и контроля за поступлением товаров.

В результате неудовлетворительной адаптации, несоответствия потребностям и отсутствия контроля за использованием СИЗ, несвоевременного обновления традиционные системы их выдачи не могут обеспечивать эффективную безопасность работников. В целях минимизации рисков профессионального травматизма на производстве требуется внедрение системы непрерывного анализа и обновления системы обеспечения СИЗ. Оптимальным решением данной задачи является разработка и внедрение цифровой платформы, основанной на мо-

бильном приложении с расширенным функционалом и интуитивно понятным пользовательским интерфейсом. Такая платформа должна интегрировать ключевые направления развития цифрового строительства в России, такие как внедрение технологии информационного моделирования зданий (BIM), автоматизация и роботизация производственных процессов.

Благодаря внедрению цифрового продукта для смартфонов «СтройКонтроль+» для автоматизации учета выдачи СИЗ усовершенствовался процесс выдачи средств индивидуальной защиты работникам, что позволило достичь улучшения показателей, представленных в таблице 2.

Таблица 2

Оценка эффективности внедрения приложения «СтройКонтроль+»

Показатели эффективности внедрения цифровых решений	2022 г. Выдача СИЗ по традиционному методу	2023 г. Выдача СИЗ с использованием приложения «СтройКонтроль+»
Количество микротравматических повреждений, вызванных:	350	286
− некорректным использованием персоналом средств индивидуальной защиты (СИЗ);	50	42
− недостаточной квалификацией сотрудников в области применения средств индивидуальной защиты;	45	37
− отсутствием у работника необходимых СИЗ	55	30
Количество правильных ответов при проверке знаний работников в ходе тестирования по программе обучения использованию (применению) средств индивидуальной защиты	65–72 %	85–99 %
Среднее время замены неисправных СИЗ от заявки до получения	30 дней	10 дней
Среднее время реагирования ответственных лиц на выявленные замечания или нарушения, связанные с применением СИЗ работниками	10 дней	2 дня

Для методического наполнения цифрового продукта «СтройКонтроль+» разработаны учебные материалы для работы с персоналом, в том числе инструкции по применению СИЗ, иллюстрированные памятки по правилам использования средств защиты, тестовые задания для проверки знаний.

В дальнейшем планируется усовершенствовать систему выдачи СИЗ за счет интеграции с данными по динамической оценке профессиональных рисков и специальной оценке условий труда, что позволит повысить эффективность функционирования системы управления охраной труда.

Список литературы / References

1. Тимофеева Н.В. Красильникова А.М. Разработка интерфейса системы информационной поддержки процесса учёта средств индивидуальной защиты сотрудников предприятия. *Тенденции развития науки и образования.* 2021;(80–2):163–169. https://doicode.ru/doifile/lj/80/lj12_2021_p2.pdf

Timofeeva NV, Krasil'nikova AM. Development of the Interface of the Information Support System for the Process of Accounting for Personal Protective Equipment of Employees of the Enterprise. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya.* 2021;(80–2):163–169. https://doicode.ru/doifile/lj/80/lj12_2021_p2.pdf (In Russ.)

2. Стиканова В.Е., Журавлева С.В. Разработка рекомендаций по усовершенствованию системы обеспечения работников средствами индивидуальной защиты. В: *Материалы II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Инженерные задачи: проблемы и пути решения».* Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова; 2021. С. 231–234.

Stikanova VE, Zhuravleva SV. Development of Recommendations for Improving the System of Providing Employees with Personal Protective Equipment. In: *Materials of the II All-Russian (national) scientific and practical conference "Engineering tasks: problems and solutions".* Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov; 2021. P. 231–234. (In Russ.)

3. Трубецков А.Д., Махонько М.Н., Шкробова Н.В., Шелехова Т.В. Проблемы использования средств индивидуальной защиты в современных условиях. *Медицина труда и промышленная экология.* 2023;63(5): 336–343. https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-5-336-343

Trubetskov AD, Makhonko MN, Shkrobova NV, Shelekhova TV. Problems of Using Personal Protective Equipment in Modern Conditions. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology.* 2023;63(5): 336–343. https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-5-336-343 (In Russ.)

4. Tom Ka Man Wong, Siu Shing Man, Alan Hoi Shou Chan. Critical Factors for the Use or Non-Use of Personal Protective Equipment amongst Construction Workers. *Safety Science.* 2020;126:104663. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104663

5. Дементьева А.И., Бузикова О.М. Цифровизация системы по охране труда и здоровью работающих: структура, приоритеты, нормативы, управление, средства индивидуальной защиты. В: *Сборник статей XXII Международной научно-практической конференции «Экология и безопасность жизнедеятельности».* Пенза: Пензенский государственный аграрный университет; 2022. С. 87–91.

Dementieva AI, Buzikova OM. Digitalization of the System for Occupational Safety and Health of Workers: Structure, Priorities, Regulations, Management, Personal Protection Means. In: *Collection of articles of the XXII International scientific and practical conference "Ecology and life safety".* Penza: Penza State Agrarian University; 2022. P. 87–91. (In Russ.)

6. Nath ND, Behzadan AH, Paal SG. Deep Learning for Site Safety: Real-Time Detection of Personal Protective Equipment. *Automation in Construction.* 2020;112:103085. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103085

7. Zijian Wang, Yimin Wu, Lichao Yang, Arjun Thirunavukarasu ,Colin Evison, Yifan Zhao. Fast Personal Protective Equipment Detection for Real Construction Sites Using Deep Learning Approaches. *Sensors.* 2021;21(10):3478. https://doi.org/10.3390/s21103478

8. Едаменко А.С., Ястребинская А.В. Анализ опасностей и оценка риска аварий на объектах хранения нефтепродуктов. *Технологии техносферной безопасности.* 2023;3(101):60–73. https://doi.org/10.25257/TTS.2023.3.101.60-73

Edamenko AS, Yastrebinskaya AV. Hazard Analysis and Accident Risk Assessment at Petroleum Product Storage Facilities. *Technosphere Security Technologies.* 2023;3(101):60–73. https://doi.org/10.25257/TTS.2023.3.101.60-73 (In Russ.)

9. Жданов В.В. Последовательность процесса передачи данных автоматизированной выдачи средств индивидуальной защиты. *Нацразвитие. Наука и образование.* 2023;10(22):29–30.

Zhdanov VV. Data Transmission Process for the Automated Distribution of Personal Protective Equipment. *National Development. Science and Education.* 2023;10(22):29–30. (In Russ.)

10. Бахонина Е.И., Насибуллина В.А., Гайбадуллин Ф.Ф., Федосова Е.А. Обзор законодательства, регламентирующего порядок выдачи средств индивидуальной защиты. *Евразийский юридический журнал.* 2023;9(184):239–240.

Bakhonina EI, Nasibullina VA, Gaybadullin FF, Fedosova EA. Review of Legislation Regulating the Procedure for Issuing Personal Protective Equipment. *Eurasian Law Journal.* 2023;9(184):239–240. (In Russ.)

11. Власова К.А., Корепанов А.В. Разработка автоматизированной системы учета СИЗ АО «Элеконд». В: *Труды Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, промышленности и образовании».* Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова; 2022. С. 94–101.

Vlasova KA, Korepanov AV. Development of an Automated Accounting System for the PPE of Elecond JSC. In: *Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference "Information Technologies in Science, Industry and Education".* Izhevsk: Kalashnikov Izhevsk State Technical University; 2022. P. 94–101. (In Russ.)

12. Быстров Е.Н. Харламова А.В. Обеспечение средствами индивидуальной защиты работников предприятий транспортной сферы. *Известия Петербургского университета путей сообщения.* 2023;20(2): 396–403. https://doi.org/10.20295/1815-588X-2023-2-396-403

Bystrov EN, Kharlamova AV. Provision of Personal Protective Equipment for Employees of Transport Enterprises. *Proceedings of Petersburg Transport University.* 2023;20(2):396–403. https://doi.org/10.20295/1815-588X-2023-2-396-403 (In Russ.)

13. Егорова Л.Г., Суходоев В.А. Алгоритмическое обеспечение для автоматизации комплекса регистрации типовых норм выдачи средств индивидуальной защиты на промышленном предприятии. В*: Сборник научных трудов. AB OVO... (С самого начала...).* Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова; 2021;6:4–9.

Egorova LG, Sukhodoev VA. Algorithmic Support for Automation of the Complex of Registration of Standard Norms for the Issuance of Personal Protective Equipment at an Industrial Enterprise. In: *Collection of scientific papers. AB OVO... (From the very beginning...).* Magnitogorsk: Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov; 2021;6:4–9. (In Russ.)

14. Бахонина Е.И., Матузов Г.Л., Каримова В.А. Особенности обеспечения работников СИЗ в Российской Федерации и зарубежных странах. *Безопасность жизнедеятельности.* 2022;6(258):11–16.

Bakhonina EI, Matuzov GL, Karimova VA. Features of Providing PPE Workers in the Russian Federation and Foreign Countries. *Life Safety.* 2022;6(258):11–16. (In Russ.)

15. Богданов А.С. Практические особенности реализации риск- ориентированного подхода в системе управления охраной труда. *Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах.* 2023;6:4–8. https://doi.org/10.33920/pro-05-2306-01

Bogdanov AS. Practical Features of the Implementation of a Risk-Based Approach in the Occupational Safety Management System. *Occupational Health and Safety in Logging and Woodworking Industries.* 2023;6:4–8. https://doi.org/10.33920/pro-05-2306-01 (In Russ.)

Об авторах:

Виктория Александровна Петрова, аспирант кафедры безопасность жизнедеятельности Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова (308012, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), SPIN-код: 2361-2396, ORCID, ResearcherID, ScopusID, lezhand@mail.ru

Елена Владимировна Климова, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой безопасность жизнедеятельности Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова (308012, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), SPIN-код: 7194-0598, ORCID, ScopusID, lena_1109@mail.ru

Александр Юрьевич Семейкин, кандидат технических наук, доцент кафедры безопасность жизнедеятельности Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова (308012, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), SPIN-код: 4768-3762, ORCID, ResearcherID, ScopusID, alexsem-n@yandex.ru

Оксана Николаевна Томаровщенко, кандидат технических наук, доцент кафедры безопасность жизнедеятельности Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова (308012, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), SPIN-код: 2726-5676, ORCID, ResearcherID, ScopusID, ox.guzeeva@yandex.ru

***Заявленный вклад авторов*:**

Авторы внесли равноценный вклад в постановку задачи и определение цели исследования, проведение экспериментов и обработку полученных результатов, формулирование выводов и корректировку текста статьи.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Viktoriya A. Petrova, Postgraduate Student of the Life Safety Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukova Str., Belgorod, 308012, Russian Federation), SPIN-code: 2361-2396, ORCID, ResearcherID, ScopusID, lezhand@mail.ru

Elena V. Klimova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Life Safety Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukova Str., Belgorod, 308012, Russian Federation), SPIN-code: 7194-0598, ORCID, ScopusID, lena_1109@mail.ru

Alexander Yu. Semeykin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Life Safety Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukova Str., Belgorod, 308012, Russian Federation), SPIN-code: 4768-3762, ORCID, ResearcherID, ScopusID, alexsem-n@yandex.ru

Oksana N. Tomarovshchenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Life Safety Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukova Str., Belgorod, 308012, Russian Federation), SPIN-code: 2726-5676, ORCID, ResearcherID, ScopusID, ox.guzeeva@yandex.ru

Claimed Contributorship:

The authors contributed equally to the formulation of the research question and the definition of the objectives, conducting experiments and analyzing the results, drawing conclusions, and editing the manuscript.

Conflict of Interest Statement: **the authors do not have any conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 22.05.2024
Поступила после рецензирования / Revised 11.06.2024
Принята к публикации / Accepted 16.06.2024

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 517.95
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-39-48

Статья-перспектива



EDN: DHTHBS

Применение методов усвоения данных наблюдений для моделирования распространения загрязняющих веществ в водоеме и управления устойчивым развитием



Ю.В. Белова ✉, **А.В. Никитина**
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ yvbelova@yandex.ru

Аннотация

Введение. Математические модели и методы повсеместно используются для исследования природных объектов, заменяя более дорогие натурные эксперименты. Одними из трудностей, возникающих при моделировании процессов в сложных системах, являются наличие входных данных и подбор параметров модели. Применение методов усвоения данных наблюдений является одним из способов оснащения математических моделей входными данными и значениями параметров. Цель настоящего исследования состоит в прогнозировании на основе методов математического моделирования развития сложных природных систем в условиях загрязнения вредными веществами. Для достижения цели были решены следующие задачи: выбран метод усвоения данных наблюдений, актуализирована математическая модель биологической кинетики, данная модель скомплексирована с моделью гидродинамики, разработан программный комплекс. Актуальность работы заключается в применении нового подхода к реализации модели динамики фитопланктонных популяций (эвтрофикации) Азовского моря при наличии загрязняющих примесей, основанного на применении вариационных методов усвоения данных, полученных в ходе экспедиционных исследований.

Материалы и методы. Распространение загрязняющих веществ моделируется на основе трехмерной математической модели, основанной на системе уравнений конвекции — диффузии — реакции. На входе модели подается вектор движения водной среды. Составляющие вектора скорости течений в прибрежной системе рассчитываются на основе математической модели гидродинамики, базирующейся на трех уравнениях движения и уравнении неразрывности. Разработанный на основе описанных моделей программный комплекс получает на входе натурные данные, собранные в ходе экспедиционных исследований, и позволяет уточнять модель загрязнения водной среды и биоты благодаря применению вариационных методов усвоения данных.

Результаты исследования. Построен краткосрочный прогноз распространения загрязняющих веществ на выходе из Таганрогского залива. Проведенный вычислительный эксперимент отражает динамику распространения загрязняющих веществ от источников заражения на временном интервале от 3 до 12 дней.

Обсуждение и заключение. Рассмотренные в данном исследовании вариационные методы усвоения данных наблюдений позволяют уточнять и дополнять математические модели динамики фитопланктонных популяций и распространения загрязняющих веществ. Программное обеспечение, основанное на описанных в данной работе математических моделях, дает возможность строить кратко- и среднесрочные прогнозы распространения вредных примесей, оценивать их влияние на развитие основных видов фитопланктонных популяций в Азовском море и определять стратегии управления устойчивым развитием.

Ключевые слова: модель эвтрофикации, модель гидродинамики, вариационные методы, опасные явления, усвоение данных наблюдений

Благодарности. Авторы благодарят редакционную команду журнала и анонимных рецензентов за высказанные замечания, которые позволили повысить качество статьи, а также выражают признательность руководителю проекта, члену-корреспонденту РАН Александру Ивановичу Сухинову.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22–11–00295, https://rscf.ru/project/22-11-00295/

Для цитирования. Белова Ю.В., Никитина А.В. Применение методов усвоения данных наблюдений для моделирования распространения загрязняющих веществ в водоеме и управления устойчивым развитием. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(3):39–48. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-39-48

Perspective Article

Application of Methods of Observational Data Assimilation to Model the Spread of Pollutants in a Reservoir and Manage Sustainable Development

Yuliya V. Belova ✉, **Alla V. Nikitina**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ yvbelova@yandex.ru

Abstract

Introduction. Mathematical models and methods are widely used to study natural phenomena, replacing more expensive field experiments. However, one of the main challenges in modeling processes in complex systems is the lack of available input data and difficulty in selecting model parameters. The use of observational data assimilation methods is one of the ways to provide mathematical models with input data and parameter values. The aim of this study was to predict the development of complex natural systems under conditions of pollution using mathematical modeling techniques. To achieve this, several tasks were completed: a method for assimilating observational data was selected, a mathematical model for biological kinetics was updated, it was integrated with a hydrodynamic model, and a software package was developed. The significance of the work lies in the to the implementation of a model of the dynamics of phytoplankton populations (eutrophication) of the Azov Sea in the presence of pollutants, based on the use of variational methods for assimilating data obtained during expeditionary research.

Materials and Methods. The spread of pollutants was modeled using a three-dimensional mathematical model based on a system of convection — diffusion — reaction equations. The vector of movement of the aquatic environment was the input data for the model. The components of the current velocity vector in the coastal system were calculated using a mathematical model of hydrodynamics, based on three equations of motion and the equation of continuity. The software package developed based on these models received full-scale data collected during expeditionary research as input, and allowed us to refine the model of pollution in the aquatic environment and biota using variational methods for data assimilation.

Results. A short-term forecast for the spread of pollutants at the outlet of the Taganrog Bay was developed. The conducted computational experiment reflected the dynamics of pollutant spread from sources of contamination over a period of 3 to 12 days.

Discussion and Conclusion. The variational methods of assimilating observational data discussed in this study allow for the refinement and supplementation of mathematical models of phytoplankton population dynamics and pollutant spread. The software based on these mathematical models enables the creation of short- and medium-term forecasts for the spread of harmful substances, assessment of their impact on the growth of major phytoplankton species in the Azov Sea, and determination of strategies for sustainable development management.

Keywords: eutrophication model, hydrodynamics model, variational methods, dangerous phenomena, assimilation of observational data

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial team of the Journal and anonymous reviewers for their competent expertise and valuable recommendations for improving the quality of the article. The authors also express their gratitude to the project leader, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Aleksandr I. Sukhinov.

Funding Information. The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22–11–00295, https://rscf.ru/en/project/22-11-00295/

For citation. Belova YuV, Nikitina AV. Application of Methods of Observational Data Assimilation to Model the Spread of Pollutants in a Reservoir and Manage Sustainable Development. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(3):39–48. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-39-48

Введение. Математические модели и методы уже несколько десятилетий успешно применяются для проведения исследований в различных сферах науки и инженерии. Математическое моделирование предоставляет быстрый, удобный и относительно недорогой инструментарий для изучения и прогнозирования процессов, протекающих в сложных, по сравнению с экспедициями и натурными экспериментами, природных системах, и применяет-

ся для решения многих научных и практических задач. Так, например, могут быть решены задачи прогностического моделирования заиления судоходных путей, что важно для безопасного судоходства, а также предсказания последствий чрезвычайных ситуаций и катастроф техногенного характера. Примером может служить сильный шторм 11 ноября 2007 года в азово-черноморском бассейне, в результате которого более 20 судов потерпели крушение, а район Керченского пролива стал местом экологической катастрофы. В воду попало несколько тонн мазута и серы, в результате чего произошло заражение береговой линии и седиментного слоя соединениями нефтепродуктов, последствия его наблюдались еще несколько лет. Другой пример неблагоприятных процессов — транспорт донных материалов из устья реки Дон в Таганрогский залив, что влияет на ареалы гидробионтов, способствует интенсивной эвтрофикации и приводит к размножению комара-звонца (Chironomidae Newman).

Согласно Постановлению Правительства РФ № 2451 от 31.12.2020 г.[1], всего лишь четыре часа с момента обнаружения или с момента поступления информации о разливе в водоеме есть у исследователей, ответственных лиц, принимающих решения, а также представителей водоохранных служб для расчета изменения концентрации нефти и нефтепродуктов и их локализации. Согласно приведенному и другим нормативным документам, принятым Правительством РФ, ответственные лица и структуры должны принять решение и произвести действия по устранению опасной экологической ситуации природного и техногенного характера в течение нескольких часов-суток. Исходя из этого время построения прогнозов и сценариев развития чрезвычайной ситуации (ЧС) ограничено. Это требование определяет актуальность разработки комплекса математических моделей гидродинамики и гидробиологии, которые учитывали бы особенности прибрежных систем (воздействие ветров на структуру течений, силу Кориолиса, сложную геометрию расчетной области, турбулентный обмен, испарение, сгонно-нагонные явления, стоки рек и др.) и позволяли получать прогнозы за минимальное время.

При построении прогнозов развития природных систем и попытке описать реальное физическое явление средствами математического моделирования зачастую только лишь построения функции состояния моделей процессов недостаточно. Повысить точность решения позволяет использование для математических моделей сопряженных задач, а также алгоритмов, базирующихся на вариационных принципах. Эти принципы позволяют установить связь модели с натурными данными [1]. Такая методология является эффективной при решении прикладных, в том числе и вычислительно трудоемких задач, например вариационных и оптимизационных задач математической и ядерной физики [2]. Г.И. Марчуком и его последователями применялись сопряженные уравнения [3], что позволило повысить эффективность решения задач аэро- и гидрофизики для атмосферы и глубоководных водоемов, а также была усовершенствована теория построения сопряженных операторов для линейных и нелинейных моделей [4].

Вариационный подход к решению объединенных прямых и сопряженных задач с использованием методов усвоения позволил улучшить связь между математическими моделями и натурными данными. Методы усвоения данных, которые развиваются с 1960-х годов, основаны на построении обратных и оптимизационных задач с использованием двух подходов: классического вариационного принципа Лагранжа с применением сопряженных задач [4] и оптимизационных методов типа взвешенных наименьших квадратов [5].

Усвоение данных наблюдений является инструментарием, который позволяет существенно повысить точность прогностического моделирования природных процессов, он давно и успешно применяется ученым сообществом [6]. Здесь актуальной задачей становится разработка новых методов, которые позволили бы существенно сократить время расчетов.

Материалы и методы. При построении моделей прогнозирования природных явлений и процессов одними из основных проблем являются вопросы соответствия решения, полученного с использованием математической модели, реальному процессу, протекающему в природной системе, и уменьшения процента неопределенностей.

При построении математических моделей гидродинамических и гидробиологических процессов требуется информация о начальных условиях и параметрах модели, которая может быть получена с помощью данных наблюдений. Таким образом, при построении прогностических сценариев протекания ЧС природного или техногенного характера очень важно оценить адекватность самой математической модели. Следующий этап моделирования включает в себя проверку корректности, устойчивости поставленной задачи. Исследование математической модели на непрерывном уровне предполагает исследование влияния входных данных на решение модельной задачи. Возмущение правых частей используемого уравнения или системы уравнений в частных производных в рассматриваемой задаче Коши позволяет при известных операторах исследовать свойства построенной математической модели. Исследование стационарных и особых точек непрерывной функции или нескольких функций — решений поставленной задачи, например концентрации одного или нескольких загрязняющих водную среду веществ, позволяет разработать сценарии, от пессимистичного до оптимистичного режимов, с целью разработки мер эффективного управления сложной водной экосистемой.

[1] *Об утверждении Правил организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации, за исключением внутренних морских вод Российской Федерации и территориального моря Российской Федерации.* Постановление Правительства РФ № 2451 от 31.12.2020 г. URL: https://docs.cntd.ru/document/573319208 (дата обращения: 21.05.2024).

Впервые для анализа натурных данных был применен метод полиномиальной интерполяции данных постоянно пополняемой базы экологических замеров в двумерном случае. Для наблюдений были определены области влияния. При реализации алгоритма для расчета в текущий момент background — данные ранее полученного прогноза — использовались как входная информация.

Методология решения задач усвоения данных вышла на новый уровень с появлением метода OI (Optimal Interpolation), или метода статистической интерполяции.

Следующий этап развития рассматриваемых методов связан с развитием и реализацией вариационных методов, включая теорию оптимального управления. Эти методы базируются на минимизации функционала, построенного специальным образом, с помощью которого устанавливается связь между решениями и наблюдениями (натурными замерами, экспедиционными данными, базами геоинформационных систем ГИС).

Данная теория и методы широко используются при реализации задач метеорологии [5] и динамической океанографии [7]. В процессе минимизации построенного функционала необходимо вычислять его градиент, для чего успешно применяются сопряженные уравнения, что описано в работах [8, 9].

Модель динамики фитопланктонных популяций. Математическая модель динамики фитопланктонных популяций описывает процесс активного роста микроводорослей при наличии достаточного количества биогенных элементов. Если развитие фитопланктонных популяций становится слишком интенсивным, говорят о процессе эвтрофикации. Причины эвтрофикации могут иметь как природный (климатические изменения), так и антропогенный характер (поступление в водоем значительного количества биогенных веществ со стоками рек). В системе C_i — значения концентрации i-ой субстанции [10, 11]:

$$\frac{\partial C_k}{\partial t}+\frac{\partial (uC_k)}{\partial x}+\frac{\partial (vC_k)}{\partial y}+\frac{\partial \left((w+w_{C,k})C_k\right)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_k\frac{\partial C_k}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_k\frac{\partial C_k}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_k\frac{\partial C_k}{\partial z}\right)+\psi_k, \quad (1)$$

где $\mathbf{u}=\{u, v, w\}$ — вектор скорости среды (водного потока); $w_{C,k}$ — гравитационное осаждение k-ой компоненты, если она находится во взвешенном состоянии; μ_k, ν_k — горизонтальная и вертикальная составляющие коэффициента турбулентного обмена для k-ой компоненты; ψ_k — химико-биологический источник (сток) или член, описывающий агрегирование (слипание-разлипание), если соответствующая компонента является взвесью, индекс k указывает на вид субстанции, $k=\overline{1,15}$:

1 — сероводород (H_2S);
2 — элементная сера S;
3 — тиосульфаты (и сульфиты);
4 — сульфаты (SO_4);
5 — общий органический азот (N);
6 — аммоний (NH_4 — аммонийный азот);
7 — нитраты (NO_3);
8 — нитриты (NO_2);
9 — фитопланктон;
10 — зоопланктон;
11 — силикаты (SiO_3 — метасиликат; SiO_4 — ортосиликат);
12 — растворенный кислород (O_2);
13 — железо (Fe^{2+});
14 — фосфаты (PO_4);
15 — кремнекислота (H_2SiO_4, H_2SiO_3 — ортокремневая и метакремневая кислоты соответственно);
16 — микропластик.

Система (1) содержит уравнения, которые можно отнести к типу конвекции — диффузии — реакции. В качестве расчетной области рассмотрим замкнутый бассейн G. Невозмущенная поверхность водоема Σ_0 ограничивает сверху G, $\Sigma_b=\Sigma_b(x, y)$ — донная поверхность снизу. σ — цилиндрическая поверхность, ограничивает G сбоку. Введем обозначение: $\Sigma=\Sigma_0\cup\sigma\cup\Sigma_b$ — кусочно-гладкая граница области G, временной интервал $0<t\le T_0$. Полагаем, что $\mathbf{n}$ и $\mathbf{u_n}$ — вектор внешней нормали и нормальная составляющая $\mathbf{u}$ к поверхности Σ.

Считаем, что начальные условия для системы (1) выглядят следующим образом: $C_k|_{t=0}=C_{k0}(x, y, z)$, $k=\overline{1,15}$.

Скомплексируем (1) со следующими комбинированными граничными условиями: на σ: если $\mathbf{u_n}<0$, то $C_k=0$; если $\mathbf{u_n}\ge 0$, то $\frac{\partial C_k}{\partial \mathbf{n}}=0$; на Σ_0: $\frac{\partial C_k}{\partial z}=g(C_k)$; на дне Σ_b: $\frac{\partial C_k}{\partial z}=-\varepsilon_k C_k$, $k=\overline{1,16}$, определим ε_k как коэффициент поглощения k-ой примеси донными отложениями.

При безветрии, особенно в летний период, в придонных слоях мелководных водоемов, таких как, например, Азовское море, Таганрогский залив, Геленджикская бухта, могут возникнуть практически анаэробные условия. Восстановление водонасыщенного поверхностного ила влечет за собой высвобождение в раствор железа, фосфатов, сульфатов, марганца, аммония и силикатов, а также органических соединений. Скомплексированные модели вида (1) (разработанная авторским коллективом и модель гидродинамики [12]) используются для изучения механизмов окисления и восстановления марганца, ассимиляции NH_4, нитрификации, нитратредукции (денитрификации), аммонификации, окисления H_2S, сульфатредукции и др. Эксперименты с моделью (1) дают возможность изучать биогенный и кислородный режимы прибрежной системы, анализировать механизм формирования вследствие антропогенной эвтрофикации заморных явлений рыб и других гидробионтов.

Вариационный подход для пространственно-трёхмерной математической модели эвтрофикации вод. Запишем математическую модель (1) для расчетной области (Азовское море) в виде операторного уравнения:

$$L\left(C,\mathbf{Y}\right)\equiv D\frac{\partial C}{\partial t}+J\left(C,\mathbf{Y}\right)-\boldsymbol{\psi}-\mathbf{r}=0\,, \tag{2}$$

определим $\mathbf{C}$ как вектор-функцию состояния изучаемой водной экосистемы $\mathbf{C}=\left\{C_k\left(\mathbf{x},t\right),k=\overline{1,16}\right\}$, $\mathbf{C}=\mathbf{C}\left(\mathbf{x},t\right)\in Q\left(Ц_t\right)$, $Ц_t=G\times\left(0,T_0\right)$, $\left(\mathbf{x},t\right)\in Ц_t$; $J\left(\mathbf{S},\mathbf{Y}\right)$ — дифференциальный нелинейный пространственный оператор; D — диагональная матрица; $\boldsymbol{\psi}=\left\{\psi_k\left(\mathbf{x},t\right),k=\overline{1,16}\right\}$ — вектор, компонентами которого являются функции источников; $\mathbf{r}=\left\{r_k\left(\mathbf{x},t\right),k=\overline{1,16}\right\}$ — вектор, компоненты которого содержат функции неопределенностей и ошибок математической модели (1) с начальными и граничными условиями. Зависимости (модели наблюдений), коэффициенты и параметры $w_{C,k}$, μ_k, u, v, w, v_k входные данные начальных и краевых условий для модели (2), $k=\overline{1,16}$; внутренние параметры операторов включаются в $\mathbf{Y}\in R\left(Ц_t\right)$.

Пусть $t=0$, тогда начальные условия для (2) будут иметь вид:

$$\mathbf{C}=\mathbf{C}_a^0+\xi,\ \mathbf{Y}=\mathbf{Y}_a^0+\zeta, \tag{3}$$

где $\mathbf{C}_a^0$ и $\mathbf{Y}_a^0$ — априорные оценки вектор-функции состояния и вектора параметров соответственно; функции неопределенностей обозначены с помощью ξ и ζ.

Рассмотрим интегральное тождество:

$$I\left(\mathbf{C},\mathbf{Y},\mathbf{C}^*\right)\equiv\int\limits_{Ц_t}\left(L\left(\mathbf{C},\mathbf{Y}\right),\mathbf{C}^*\right)dGdt=0, \tag{4}$$

здесь $\mathbf{C}^*$ — это функции, сопряженные к $\mathbf{C}(\mathbf{C}^*\in Q^*(Ц_t))$. (4) представляет собой вариационную постановку модельной задачи (2), (3), или функционал энергетического типа. Перепишем (4) в следующем виде:

$$I\left(\mathbf{C},\mathbf{Y},\mathbf{C}^*\right)\equiv\sum_{k=1}^{16}\left\{\left(\Lambda\mathbf{C},\mathbf{C}^*\right)_k-\int\limits_{Ц_t}\left(\psi_k+r_k\right)\mathbf{C}_k^*dGdt\right\}=0\,. \tag{5}$$

Операторы турбулентного обмена и переноса входят в слагаемые $(\Lambda\mathbf{C},\mathbf{C}^*)$.

Модель гидродинамики [12] будем считать моделью процесса. В моделях гидробиологии параметризацию параметров и в результате полученные функциональные зависимости, например, для описания продукционно-деструкционных процессов или роста фито- или зоопланктона будем считать подмоделями, или моделями наблюдений. Определим зависимость между замерами и функциями состояния:

$$\boldsymbol{\varphi}_m=\left[\mathbf{W}\left(\mathbf{C}\right)\right]_m+\boldsymbol{\eta}\left(\mathbf{x},t\right), \tag{6}$$

где $[\mathbf{W}(\mathbf{C})]_m$ — вектор подмоделей (моделей наблюдений); $\boldsymbol{\eta}(\mathbf{x},t)$ — вектор ошибок и неопределенностей; $\boldsymbol{\varphi}_m$ — величины, за которыми осуществляем наблюдение.

Определим $\boldsymbol{\varphi}_m$ на $Ц_t^m\in Ц_t$. В (6) операция переноса информации с $Ц_t$ на $Ц_t^m$ обозначена квадратными скобками.

Расширим систему моделирования данными натурных замеров (считаем их близкими к точным), при этом функционал «качества» будет иметь следующий вид:

$$\Phi_0\left(\mathbf{C}\right)=\left\{\left(\boldsymbol{\varphi}_m-\left[\mathbf{W}\left(\mathbf{C}\right)\right]_m\right)^{\tau}M\chi_0\left(\boldsymbol{\varphi}_m-\left[\mathbf{W}\left(\mathbf{C}\right)\right]_m\right)\right\}_{Ц_t^m}\equiv\left(\boldsymbol{\eta}^{\tau}C_1\boldsymbol{\eta}\right), \tag{7}$$

определим χ_0 как весовую функцию для определения конфигурации носителя наблюдений $Ц_t^m$ в $Ц_t$ и интегралы по области $Ц_t$, представляющие собой меру для (7) в виде $C_1=M\chi_0(\mathbf{x},t)$, где M — весовая матрица.

Рассмотрим функционалы, представляющие собой обобщенные характеристики поведения гидробиогеоценоза:

$$\Phi_k(\mathbf{C}) = \int_{Ц_t} F_k(\mathbf{C})\chi_k(\mathbf{x},t)\,dGdt \equiv (F_k,\chi_k),\ \chi_k \subset Q^*(Ц_t),\ k=\overline{1,K}.$$

$F_k(\mathbf{C})$ — ограниченные и дифференцируемые относительно $\mathbf{C} \in Q(Ц_t)$ функции, которые будем оценивать.

Определим функционал для минимизации неопределенностей:

$$\tilde{\Phi}_k^h(\mathbf{C}) = \Phi_k^h(\mathbf{C}) + \Big\{ \left(\boldsymbol{\eta}^\tau C_1 \boldsymbol{\eta}\right)^h_{Ц_t^m} + \left(\mathbf{r}^\tau C_2 \mathbf{r}\right)^h_{Ц_t^m} + \left(\left(\mathbf{C}^0-\mathbf{C}_a^0\right)^\tau C_3\left(\mathbf{C}^0-\mathbf{C}_a^0\right)\right)^h_{Ц_t^m} + \left(\left(\mathbf{Y}^0-\mathbf{Y}_a^0\right)^\tau C_4\left(\mathbf{Y}^0-\mathbf{Y}_a^0\right)\right)^h_{R^h\left(Ц_t^m\right)} \Big\}/2 + I^h\left(\mathbf{C},\mathbf{Y},\mathbf{C}^*\right), k \ge 1. \tag{8}$$

Считаем, что C_i — весовые матрицы, $i=\overline{1,4}$. Рассмотрим систему:

$$\frac{\partial \tilde{\Phi}_k^h}{\partial \mathbf{C}^*} \equiv D\Lambda_t \mathbf{C} + J^h(\mathbf{C},\mathbf{Y}) - \boldsymbol{\psi} - \mathbf{r} = 0; \tag{9}$$

$$\frac{\partial \tilde{\Phi}_k^h}{\partial \mathbf{C}} \equiv \left(D\Lambda_t\right)^\tau \mathbf{C}_k^* + A^\tau(\mathbf{C},\mathbf{Y})\mathbf{C}_k^* + \mathbf{d}_k = 0;$$

$$\mathbf{C}_k^*(\mathbf{x})\Big|_{t=T_0} = 0;\ \mathbf{d}_k = \frac{\partial}{\partial \mathbf{C}}\left(\tilde{\Phi}_k^h(\mathbf{C}) + 0{,}5\left(\boldsymbol{\eta}^\tau C_1\boldsymbol{\eta}\right)\right);$$

$$\mathbf{C}^0 = \mathbf{C}_a^0 + C_3^{-1}\mathbf{C}_k^*(0),\ t=0;\ \mathbf{r}(\mathbf{x},t) = C_2^{-1}\mathbf{C}_k^*(\mathbf{x},t);$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Y}_a + C_4^{-1}\Gamma_k;\ \Gamma_k = \frac{\partial}{\partial \mathbf{Y}} I^h\left(\mathbf{C},\mathbf{Y},\mathbf{C}_k^*\right);$$

$$A(\mathbf{C},\mathbf{Y})\mathbf{C}' = \frac{\partial}{\partial \alpha}\left\{J^h\left(\mathbf{C}+\alpha\mathbf{C}',\mathbf{Y}\right)\right\}\Big|_{\alpha=0},\ k\ge 1.$$

$A^\tau(\mathbf{C}',\mathbf{Y})$, Λ_t определим как операторов сопряженной задачи и производных или их дискретных аппроксимаций по времени; $\boldsymbol{\Gamma}_k$ — функции чувствительности моделей к изменению параметров; $\mathbf{C}' \equiv \delta\mathbf{C}$; α — заданное число.

Рассмотрим алгоритмы усвоения данных последовательных наблюдений, поступающих из различных наблюдательных средств в систему моделирования в режиме реального времени. Для этого воспользуемся методами расщепления и декомпозиции:

$$Ц_t^h = \sum_{n=1}^{N_t-1} Ц_{tn}^h;\ Ц_{tn}^h = G^h \times [t_{n-1},t_n];\ \tilde{\Phi}^h\left(\mathbf{C},\mathbf{C}^*,\mathbf{Y},\boldsymbol{\varphi}\right) = \sum_{n=1}^{N_t-1}\sum_{l=1}^{p}\tilde{\Phi}_{nl}^h, \tag{10}$$

здесь $\tilde{\Phi}_{nl}^h$ — часть функционала (9) для $[t_{n-1}, t_n]$ на l-м этапе расщепления, $n=\overline{1,N_t}$, p определим как общее число этапов расщепления. Дискретизацию проведем на основе аддитивно-усредненных схем расщепления. Будем использовать алгоритм для нахождения решения в области $Ц_t^h$ с регулярной равномерной временной сеткой $\overline{\omega}_t^h \equiv \left\{t_n, n=\overline{0,N_t}\right\}$. Для исследований будем использовать структуру с фазовыми пространствами:

$$\left\{\mathbf{C}_l^n,\ \mathbf{C}_l^{*n},\ \mathbf{r}_l^n, l=\overline{1,p}\right\} = \bigcup_{l=1}^{p} Q_l^h\left(Ц_t^h\right) \subset Q^h\left(Ц_t^h\right).$$

Метод решения поставленной задачи. Для решения (9) считаем, что $n=\overline{1,N_t}$. Опишем пошагово алгоритм используемого метода.

1. Перейти на подсеточную структуру декомпозиции, при этом $t=t_{n-1}$:

$$\left\{\mathbf{C}^{n-1} \in Q^h\left(Ц_t^h\right)\right\},\ \bigcup_{l=1}^{p}\left\{\mathbf{C}_l^{n-1} \in Q_l^h\left(Ц_t^h\right)\right\},\ \mathbf{C}_l^{n-1} = \mathbf{C}^{n-1}.$$

2. В подсеточной структуре получить решения прямых и сопряженных задач:

$$\Lambda_l^n\mathbf{C}_l^n - \boldsymbol{\psi}_l^n - \mathbf{r}_l^n = 0,\ l=\overline{1,p},\ p\ge 1.$$

$$\Lambda_l^{*n}\mathbf{C}_l^{*n} = \left[\frac{\partial \Phi_{kl}(\mathbf{C})}{\partial \mathbf{C}} + U^\tau C_1\left(\boldsymbol{\varphi}_m - \left[\mathbf{W}(\mathbf{C})\right]_m\right)\right]_l^{n-1},$$

$$\mathbf{C}_l^{*n+1} = 0,\ \mathbf{r}_l^n = \left(C_2^n\right)^{-1}\mathbf{C}_l^{*n},\ t_n \le t \le t_n.$$

В функции $\boldsymbol{\psi}_l^n$ входят $\mathbf{C}_l^{n-1}$. $\mathbf{r}_l^n$ учитывают все неопределенности на шаге $[t_{n-1}, t_n]$.

3. Возврат в основную структуру $Q^h\left(Ц_t^h\right)$ при $t = t_n$:

$$\bigcup_{l=1}^{p}\left\{\mathbf{C}_l^n \in Q_l^h\left(Ц_t^h\right)\right\} \Rightarrow \left\{\mathbf{C}^n \in Q^h\left(Ц_t^h\right)\right\},\ \ \mathbf{C}^n = \frac{1}{p}\sum_{l=1}^{p}\mathbf{C}_l^n .$$

Считаем, что последний этап расщепления можно реализовать по формуле:

$$\Lambda_{pn}\mathbf{C}^n - \boldsymbol{\psi}_p^n - \mathbf{r}_p^n = 0\,, \qquad (11)$$

здесь $\Lambda_{pn}\mathbf{C}^n$ — оператор аппроксимации часть модели на p-м этапе; $\boldsymbol{\psi}_p^n$ — функции источников; $\mathbf{r}_p^n$ — функция неопределенностей модели (2) и вносимых в дискретную модель расщеплений на шаге. Считаем, что матрицы весов C_{1n} и C_{2n} известны.

Рассмотрим следующую задачу:

$$\Lambda_{pn}^{*}\mathbf{C}^{*n} = \alpha_{1n}C_{1n}\left(\boldsymbol{\varphi}^{n-1} - \mathbf{C}^{n-1}\right); \qquad (12)$$

$$\mathbf{r}_p^n = \left(C_{2n}^{-1} / \alpha_{2n}\right)\mathbf{C}^{*n}. \qquad (13)$$

Для решения будем использовать следующий метод, алгоритм которого опишем пошагово:

1. Рассчитать по (12) $\mathbf{C}^{*n}$.
2. Найти $\mathbf{r}_p^n$, пользуясь (13).
3. Рассчитать $\mathbf{C}^n$, используя формулу (11).

Возникающую в процессе реализации алгоритма метода СЛАУ будем решать методом прогонки.

Рассмотрим преобразованный алгоритм:

$$\Lambda_{pn}^{*}\mathbf{C}^{*n} = \alpha_{1n}C_{1n}\left(\boldsymbol{\varphi}^{n} - \mathbf{C}^{n}\right), \qquad (14)$$

$$\Lambda_{pn}\mathbf{C}^n - \boldsymbol{\psi}^n - \left(C_{2n}^{-1} / \alpha_{2n}\right)\mathbf{C}^{*n} = 0\,. \qquad (15)$$

Систему решим методом прогонки. Для рассмотренных модификаций устойчивость схем расщепления обеспечивает устойчивость используемых схем усвоения данных. Если в (8) $\mathbf{C}^* = const$, то оно дает балансовое соотношение первого порядка. В случае, если $\mathbf{C}^* = \mathbf{C}$, то получаем уравнение баланса энергии анализируемой системы.

Выпишем функционал качества для новой последующей модификации:

$$\Phi_{0n}\left(\mathbf{C}\right) = 0{,}5\left[\alpha_1\left(\boldsymbol{\eta}_n^{\tau}W_{1n}\boldsymbol{\eta}_n\right) + \alpha_2\left(\mathbf{r}_n^{\tau}W_{2n}\mathbf{r}_n\right)\right], \qquad (16)$$

$$\mathbf{r}_n = \Lambda_{pn}\mathbf{C}_n - \boldsymbol{\psi}_n;\ \boldsymbol{\eta}_n = \boldsymbol{\varphi}_n - \mathbf{C}_n;\ \alpha_1 + \alpha_2 = 1,\ \alpha_1, \alpha_2 > 0. \qquad (17)$$

Найдем минимум функционала относительно функции $\mathbf{C}^n$:

$$\Lambda_{pn}^{*}C_{1n}\left(\Lambda_{pn}\mathbf{C}^n - \boldsymbol{\Psi}^n\right) + \frac{\alpha_{1n}}{\alpha_{2n}}C_{2n}\left(\mathbf{C}^n - \boldsymbol{\varphi}^n\right) = 0\,. \qquad (18)$$

Получим однозначно разрешимую систему с пятидиагональной матрицей. Решим полученную СЛАУ методом прогонки.

Новый класс методов усвоения в реальном времени включает в себя схему аддитивного последовательного усвоения. Построенные модификации ввиду большого объема вычислительной работы ориентированы на супервычислительные системы, включая кластерные системы и графические ускорители.

Замеры $\boldsymbol{\varphi}_m$ применяются в виде карт и цифровых изображений. Такое представление дает значительную плотность данных в области $Ц_t$, замеры представляют собой информационные поля. Планирование наблюдений базируется на значениях функции неопределенностей. Там, где они большие, планируется проводить дополнительные натурные замеры или наблюдения.

Результаты исследования. Для решения задачи моделирования эвтрофикации вод Азовского моря (1) разработан комплекс параллельных программ, включающий в себя:

– модуль гидродинамических процессов, рассчитывающий поле течений водного потока на основе математической модели для мелководного водоема [12];

– модуль распространения загрязнений в водной среде и изменения концентрации основных гидробионтов (1), позволяющий оценить влияние загрязняющих веществ на биологическую продуктивность акватории;

– карту глубин Азовского моря для построения расчетных сеток для численной реализации разработанных алгоритмов;

– базу экспедиционных данных, позволяющую уточнять модель загрязнения водной среды и распространения биоты благодаря применению описанных выше методов усвоения данных.

На основе разработанного ПО проведен численный эксперимент. Вектор скорости водного потока рассчитывается с помощью модели гидродинамики при восточном ветре, скорость которого составляет 5 м/с, и подается на вход для расчета движения загрязнений, содержащих микропластиковые частицы, на основе уравнений конвекции-диффузии. На рис. 1 *а* представлены результаты численного эксперимента по расчету полей течений водного потока при указанных метеорологических условиях, на котором можно наблюдать вихревые структуры течений в районе кос, в северо-восточной части моря, в Таганрогском заливе. Градиент цвета на рис. 1 *а* отражает распределение скоростей водного потока, максимальное значение — 4,822 м/с. На рисунках 1 *б, в, г* представлены результаты расчета для модельной ситуации распространения заражения водной среды микропластиковыми частицами, попадающими в Азовское море со стоками рек Дон и Кубань, а также когда источник загрязнения опасными веществами, в том числе микропластиком, находится на выходе из Таганрогского залива. Представлен краткосрочный прогноз распространения загрязняющих веществ через 3, 6, 12 суток с момента заражения. Начальная концентрация загрязняющего вещества составила 5 мг/л, через 3 суток максимальная концентрация на выходе из Таганрогского залива составила 1,363 мг/л, через 6 суток — 0,83 мг/л, через 12 суток — 0,336 мг/л.

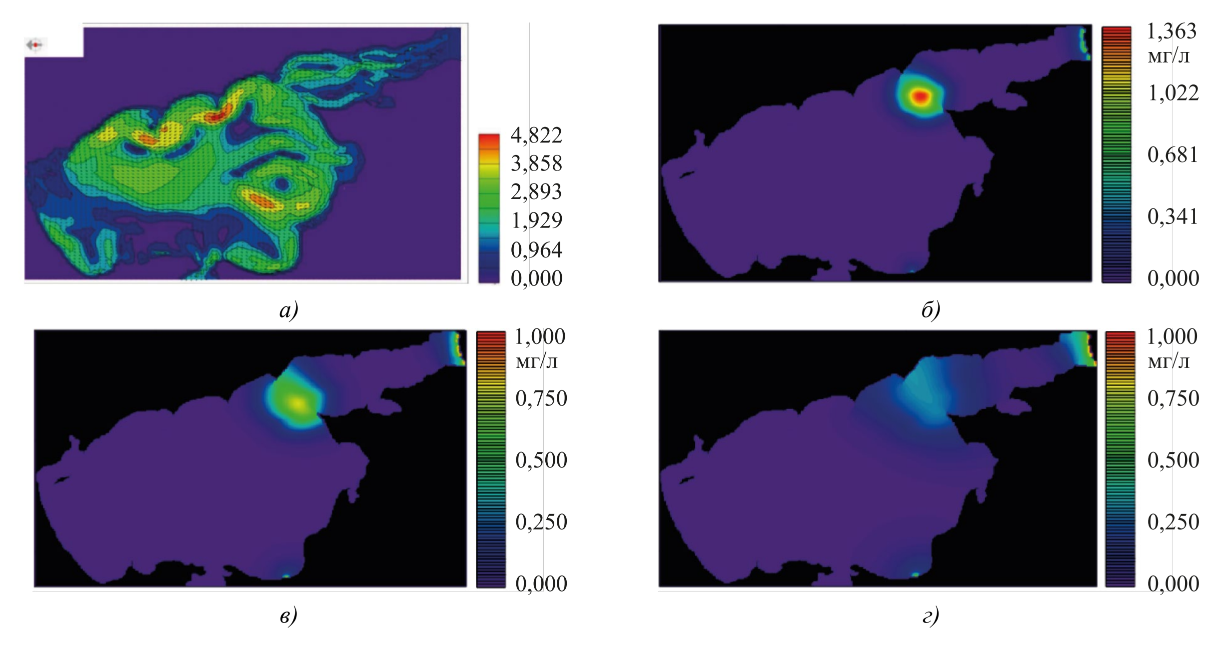


Рис. 1. Картина течений в Азовском море и распространение загрязняющих веществ, временной интервал: *а* — начальная концентрация; *б* — 3 суток; *в* — 6 суток; *г* — 12 суток

Обсуждение и заключение. Вычислительный эксперимент демонстрирует, что несмотря на восточный ветер, вихревые структуры течений захватили загрязняющие вещества и переместили их в Таганрогский залив. Устойчивые вихри потенциально могут захватывать и удерживать частицы микропластика, попадающие в море со стоками рек, а также способствовать накоплению загрязнений в придонном слое в результате биообрастания микропастиковых частиц и их затопления.

Как отмечалось выше, при построении математических моделей для прогнозирования природных явлений и процессов одной из основных проблем является проверка их адекватности путем анализа полученных на их основе результатов на соответствие поведению изучаемой природной системы. При построении математических моделей гидродинамических и гидробиологических процессов требуется информация о начальных условиях и параметрах (входных данных), которая может быть получена с помощью наблюдений. Таким образом, при построении прогностических сценариев необходимо не только оценивать качество построенной математической модели, но и усваивать данные наблюдений, исследовать чувствительность построенных моделей к изменениям входных данных.

В работе представлен подход к реализации модели динамики фитопланктонных популяций (эвтрофикации) Азовского моря с применением вариационных методов усвоения данных, полученных в ходе экспедиционных исследований. Разработанный программный комплекс использует материалы экспедиционных работ, постоянно пополняемые базы экологических данных, ГИС и позволяет уточнять модель загрязнения водной среды и распространения гидробионтов благодаря применению вариационных методов усвоения данных. Разработанный программный комплекс позволяет прогнозировать распространение загрязняющих веществ в прибрежной системе, некоторые из них, например биогенные вещества, являются питательной средой и способствуют развитию опасных микроводорослей. Данный прогноз позволяет вырабатывать стратегии по управлению устойчивым развитием природной системы.

Список литературы / References

1. Penenko AV, Khassenova ZT, Penenko VV, Pyanova EA. Numerical Study of a Direct Variational Data Assimilation Algorithm in Almaty City Conditions. *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications*. 2019;7(1):53–64 https://doi.org/10.32523/2306-6172-2019-7-1-53-64

2. Кулешов А.А., Смирнов И.Н., Танажура К.А.С., Беляев К.П. Сравнение методов усвоения данных в гидродинамических моделях циркуляции океана. *Математическое моделирование*. 2018;30(12):39–54. https://doi.org/10.31857/S023408790001935-2

Kuleshov A, Smirnov I, Tanajura K, Belyaev K. Comparison of Data Assimilation Methods into Hydrodynamic Models of Ocean Circulation. *Matematicheskoe modelirovanie.* 2018;30(12):39–54. https://doi.org/10.31857/S023408790001935-2 (In Russ.)

3. Марчук Г.И. Сопряженные уравнения и анализ сложных систем. Доклад лауреата Большой золотой медали Российской академии наук имени М.В. Ломоносова 2004 года академика Г.И. Марчука. *Вестник Российской академии наук*. 2005;75(10):911–916.

Marchuk GI. Adjoint Equations and Analysis of Complex Systems. Report by Academician G.I. Marchuk, Laureate of the 2004 Lomonosov Grand Gold Medal of the Russian Academy of Sciences. *Herald of the Russian Academy of Sciences.* 2005;75(10):911–916. (In Russ.)

4. Марчук Г.И. *Избранные труды.* Т. 2. Москва: Российская академия наук; 2018. 500 с.

Marchuk GI. *Selected Works.* Vol. 2. Moscow: Russian Academy of Sciences; 2018. 500 p. (In Russ.)

5. Кагермазов А.Х. *Цифровая атмосфера. Современные методы и методология исследования опасных метеорологических процессов и явлений*. Нальчик: Печатный двор; 2015. 214 с.

Kagermazov AKh. *Digital Atmosphere. Modern Methods and Methodology for the Study of Hazardous Meteorological Processes and Phenomena.* Nalchik: Pechatnyi dvor. 2015. 214 p. (In Russ.)

6. Shutyaev V, Zalesny V, Agoshkov V, Parmuzin E, Zakharova N. Four-Dimensional Variational Data Assimilation and Sensitivity of Ocean Model State Variables to Observation Errors. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023;11(6):1253. https://doi.org/10.3390/jmse11061253

7. Кауркин М.Н., Ибраев Р.А., Беляев К.П. Усвоение данных наблюдений в модели динамики океана высокого пространственного разрешения с применением методов параллельного программирования. *Метеорология и гидрология.* 2016;7:49–59. URL: https://rucont.ru/efd/607637 (дата обращения: 22.05.2024).

Kaurkin MN, Ibrayev RA, Belyaev KP. Assimilation of Observational Data in the High-Resolution Ocean Dynamics Model Using the Parallel Programming Methods. *Meteorologiya i Gidrologiya.* 2016;7:49–59. URL: https://rucont.ru/efd/607637 (accessed: 22.05.2024). (In Russ.)

8. Пармузин Е.И., Шутяев В.П. Чувствительность функционалов от решения задачи вариационного усвоения к входным данным о потоке тепла для модели термодинамики моря. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2023;63(4):657–666. https://doi.org/10.31857/S0044466923040130

Parmuzin EI, Shutyaev VP. Sensitivity of Functionals of the Solution to the Variational Assimilation Problem to the Input Data on the Heat Flux for a Model of Sea Thermodynamics. *Žurnal vyčislitel'noj matematiki i matematičeskoj fiziki*. 2023;63(4):657–666. https://doi.org/10.31857/S0044466923040130 (In Russ.)

9. Марчук Г.И., Шутяев В.П. Сопряженные уравнения и итерационные алгоритмы в задачах вариационного усвоения данных. *Труды института математики и механики УРО РАН.* 2011;17(2):136–150. https://doi.org/10.1134/S0081543812020113

Marchuk GI, Shutyaev VP. Adjoint Equations and Iterative Algorithms in Problems of Variational Data Assimilation. *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics*. 2011;17(2):136–150. https://doi.org/10.1134/S0081543812020113 (In Russ.)

10. Белова Ю.В., Рахимбаева Е.О., Литвинов В.Н., Чистяков А.Е., Никитина А.В., Атаян А.М. Изучение качественных закономерностей процесса эвтрофирования мелководного водоема на основе математической модели биологической кинетики. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: математическое моделирование и программирование.* 2023;16(2):14–27. https://doi.org/10.14529/mmp230202

Belova YuV, Rahimbaeva EO, Litvinov VN, Chistyakov AE, Nikitina AV, Atayan AM. The Qualitative Regularities of the Eutrophication Process of a Shallow Water Research Based on a Biological Kinetics Mathematical Model. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software.* 2023;16(2):14–27. https://doi.org/10.14529/mmp230202 (In Russ.)

11. Никитина А.В., Сухинов А.И., Угольницкий Г.А., Усов А.Б., Чистяков А.Е., Пучкин М.В. и др. Оптимальное управление устойчивым развитием при биологической реабилитации Азовского моря. *Математическое моделирование*. 2016;28(7):96–106.

Nikitina AV, Sukhinov AI, Ugolnitsky GA, Usov AB, Chistyakov AE, Puchkin MV, et al. Optimal Control of Sustainable Development in Biological Rehabilitation of the Azov Sea. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2016;28(7):96–106. (In Russ.)

12. Sukhinov A, Chistyakov A, Kuznetsova I, Belova Y, Rahimbaeva E. Solving Hydrodynamic Problems Based on a Modified Upwind Leapfrog Scheme in Areas with Complex Geometry. *Mathematics*. 2022;10(18):3248. https://doi.org/10.3390/math10183248

Об авторах:

Юлия Валериевна Белова, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики и информатики Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 6008-2235, ORCID, ResearcherID, ScopusID, yvbelova@yandex.ru

Алла Валерьевна Никитина, доктор технических наук, профессор кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 4320-8190, ORCID, ResearcherID, nikitina.vm@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Ю.В. Белова: разработка программного модуля, проведение прогностического расчета движения загрязняющих веществ, оформление научной статьи.

А.В. Никитина: описание теоретической части исследования распространения загрязняющих веществ с применением вариационных методов усвоения данных наблюдений.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Yuliya V. Belova, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Department of Mathematics and Computer Science, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation, SPIN-code: 6008-2235, ORCID, ResearcherID, ScopusID, yvbelova@yandex.ru

Alla V. Nikitina, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Computer Engineering and Automated Systems Software, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code: 4320-8190, ORCID, ResearcherID, nikitina.vm@gmail.com

Claimed Contributorship:

YuV Belova: development of a software module, predictive calculation of the movement of pollutants, design of a scientific article.

AV Nikitina: description of the theoretical part of studying the spread of pollutants using variational methods for assimilating observational data.

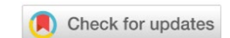
Conflict of Interest Statement: **the authors do not have any conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript

Поступила в редакцию / Received 27.05.2024
Поступила после рецензирования / Revised 19.06.2024
Принята к публикации / Accepted 26.06.2024

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY





УДК 504.06:613.1/.9

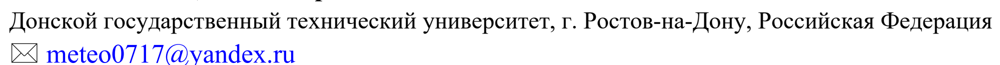
Оригинальное эмпирическое исследование

https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-49-56

Оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха и аэрогенного риска здоровью населения города Новочеркасска



П.В. Климов, Е.С. Андреева ✉



Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ meteo0717@yandex.ru

EDN: SKECCW

Аннотация

Введение. Оценка уровня загрязнения воздуха городской среды и обусловленного им риска здоровью населения является актуальной научной задачей. Как представляется, невозможно обеспечить экологическую безопасность урбанизированных зон, если качество воздуха в их пределах не соответствует установленным стандартам. Несмотря на хорошо разработанный методический аппарат, позволяющий оценить риск здоровью населения городской среды, результатов подобных исследований в региональном аспекте недостаточно. В то же время почти половина всех жителей Российской Федерации в настоящее время проживает в городах с высоким и очень высоким уровнем загрязнения воздуха. На юге России в число городов с наиболее загрязненной воздушной средой в исследуемый период 2014–2021 гг. был включен г. Новочеркасск, что и обусловило необходимость проведения соответствующих научных изысканий. Цель данного исследования — оценить показатели риска здоровью населения г. Новочеркасска, вызванного загрязнением атмосферного воздуха.

Материалы и методы. В работе использованы данные ежегодников о состоянии загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2014–2021 гг., подготовленных в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова»[1]. В числе примененных авторами методов литературные, методы математико-статистического анализа.

Результаты исследования. Уровень загрязнения атмосферного воздуха за период 2017–2021 годов достигал опасных для здоровья населения значений. Наибольший вклад в риск нарушения здоровья вносят взвешенные вещества и оксид углерода. Значения комплексного показателя P, оцененного по среднегодовым концентрациям, показали, что уровень загрязнения атмосферного воздуха в г. Новочеркасске в 1,68 раза выше, чем в крупнейшем городе региона Ростове-на-Дону. Наибольший уровень загрязнения атмосферного воздуха г. Новочеркасска отмечен в пределах поста II, находящегося на пересечении автомагистралей и приближенного к зоне воздействия промышленных предприятий.

Обсуждение и заключение. Проведенные расчеты показали, что воздействие загрязненного атмосферного воздуха может вызвать симптомы хронической интоксикации у 240–280 человек из тысячи, при достижении максимальных концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе г. Новочеркасска от 579 до 692 человек из тысячи жителей могут испытать неблагоприятные рефлекторные реакции. В связи с выявленным опасным для здоровья населения загрязнением атмосферного воздуха рекомендуется расширение площади зеленых насаждений и создание двух дополнительных постов наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха: в селитебной зоне города и вблизи Новочеркасской ГРЭС, в микрорайоне «Донской».

Ключевые слова: уровень загрязнения атмосферного воздуха, аэрогенные риски здоровью населения, неканцерогенные эффекты, канцерогенные риски здоровью, интоксикация, острое и хроническое действие

Благодарности. Авторы выражают благодарность коллегам, специалистам Федерального государственного бюджетного учреждения «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» за предоставленные материалы для исследований.

[1] *Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России. Ежегодники.* 2014–2021 гг. URL: http://voeikovmgo.ru/index.php (дата обращения: 23.05.2024).

Для цитирования. Климов П.В., Андреева Е.С. Оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха и аэрогенного риска здоровью населения города Новочеркасска. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(3):49–56. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-49-56

Original Empirical Research

Assessment of the Level of Air Pollution and Aerogenic Risk to the Health of the People of Novocherkassk

Petr V. Klimov , **Elena S. Andreeva** ✉
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ meteo0717@yandex.ru

Abstract
Introduction. Assessment of the level of urban air pollution and its impact on public health is a crucial scientific task. Ensuring the environmental safety of urban areas is impossible if the air quality does not meet the established standards. Despite well-developed methodologies for assessing the health risks of urban environments, the results of such research in the regional context are insufficient. Currently, almost half of the population of the Russian Federation lives in cities with high or very high levels of air pollution. Among these cities, Novocherkassk in the south of Russia was identified as one of the most polluted in the period from 2014 to 2021. This necessitates conducting scientific research to assess the health risks associated with atmospheric air pollution in Novocherkassk. The aim of this study was to evaluate the health risks posed to the population of Novocherkassk due to air pollution.
Materials and Methods. The study used data from annual reports on the state of air pollution in cities in Russia from 2014 to 2021, which were prepared by the Federal State Budgetary Institution “Voeikov Main Geophysical Observatory”. The authors used literary methods and methods of mathematical and statistical analysis in their work.
Results. The level of atmospheric air pollution for the period from 2017 to 2021 reached dangerous values for public health. Suspended solids and carbon oxide contributed most to the risk of health problems. The values of the complex indicator *P*, estimated by average annual concentrations, showed that the level of atmospheric air pollution in Novocherkassk was 1.68 times higher than in the largest city in the region, Rostov-on-Don. The highest level of atmospheric air pollution in Novocherkassk was noted within Post II, located at the intersection of highways and close to the impact zone of industrial enterprises.
Discussion and Conclusion. The calculations showed that exposure to polluted atmospheric air could cause symptoms of chronic intoxication in 240–280 out of every thousand people. When the maximum concentrations of pollutants in the atmospheric air of Novocherkassk were reached, from 579 to 692 people out of a thousand residents might experience adverse reflex reactions. In light of the identified health risks from air pollution, it is recommended to increase the number of green spaces and establish two additional monitoring stations for atmospheric pollution: one in the city's residential area and one near the Novocherkassk GRES power plant in the Donskoy district.

Keywords: level of atmospheric air pollution, aerogenic risks to public health, non-carcinogenic effects, carcinogenic health risks, intoxication, acute and chronic effects

Acknowledgements. The authors would like to express their gratitude to the colleagues and specialists of the Federal State Budgetary Institution “Voeikov Main Geophysical Observatory” for providing materials for the research.

For citation. Klimov PV, Andreeva ES. Assessment of the Level of Air Pollution and Aerogenic Risk to the Health of the People of Novocherkassk. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(3):49–56. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-49-56

Введение. Качество жизни, здоровье населения связаны с факторами окружающей среды, особенно антропогенными. В Российской Федерации 63,6 % населения испытывает выраженное воздействие на здоровье различных природно-экологических и социально- гигиенических факторов[2].

Для урбанизированных территорий ведущим фактором такого воздействия становится физико-химическое преобразование нижнего слоя атмосферы, обусловленное его загрязнением. Так, по данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), в 2022 году 99 % населения мира проживало в районах с высоким уровнем концентрации аэрополлютантов. Кроме того, загрязнение атмосферного воздуха стало причиной преждевременной смерти в этом же году около семи миллионов человек во всем мире. Важно отметить, что анализ воздействия средовых факторов показывает, что в России около 70 % заболеваний неинфекционного характера обусловливаются загрязнением атмосферного воздуха [1].

[2] *О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2021 году*. Государственный доклад. URL: https://www.rospotrebnadzor.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=21796 (дата обращения: 20.04.2024).

Как показывает практика, опасные для здоровья населения концентрации загрязняющих веществ чаще приурочены к центральным частям крупных городов, а также к территориям, расположенным вблизи промышленных узлов или транспортных коммуникаций. В связи с этим оценка загрязнения атмосферного воздуха по-прежнему является актуальной задачей исследований в области экологии человека. Надежным инструментом для характеристики загрязнения атмосферного воздуха является оценка показателей риска для здоровья населения. Подобная оценка позволяет всесторонне изучить масштаб воздействия загрязненного воздуха на состояние здоровья населения, дополняя действующую в России систему оценки воздействия загрязняющих веществ на здоровье.

В настоящее время немногим менее половины всего населения Российской Федерации проживает в урбанизированных зонах с высокой и очень высокой загрязненностью воздушного бассейна[3]. Удобное транспортное расположение и трудовой потенциал г. Новочеркасска способствовали формированию многоотраслевого промышленного комплекса, оказывающего существенное влияние на окружающую среду и здоровье населения. В 2021 году Новочеркасск был включен в список городов РФ с наибольшим уровнем загрязнения атмосферного воздуха [2]. В связи с вышеизложенным Новочеркасск, крупный производственных и логистический центр Ростовской области, является объектом настоящего исследования как город с наибольшим уровнем загрязнения атмосферного воздуха.

Большинство крупных промышленных предприятий Новочеркасска расположены в промышленном районе, отделенном от исторического центра города поймой реки Тузлов. Исключением является Новочеркасская ГРЭС, расположенная вблизи отдаленного микрокрайона «Донской», включенного в состав Новочеркасска в 2004 году. При восточном направлении ветра воздушные потоки от Новочеркасской ГРЭС загрязняют воздух в городе, при западном и юго-западном — воздействуют на воздух в микрорайоне «Донской». Важно отметить, что коэффициент самоочищения атмосферы на исследуемой территории составляет за год 4,39, что не способствует рассеиванию антропогенных примесей [3, 4]. Данная ситуация объясняется высокой повторяемостью метеорологических процессов, способствующих кумуляции загрязняющих веществ до опасных концентраций в приземном слое. К тому же площадь озеленения городской территории Новочеркасска составляет только 44 % от нормы, этого также недостаточно для эффективного очищения воздуха.

Как представляется авторам, комплексная оценка загрязнения приземного слоя воздуха в условиях урбанизации в последнее время не проводилась. Только с 2017 года здесь начали функционировать три стационарных мониторинговых поста контроля качества приземного воздуха, до этого на территории города велись лишь маршрутные наблюдения. Поэтому данное исследование нацелено на то, чтобы оценить риски здоровью населения Новочеркасска, вызванные загрязнением приземного слоя воздушного пространства.

Для реализации поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Произведена оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха в пределах города.
2. Рассчитаны численные значения коэффициентов и индексов неканцерогенных эффектов при остром и хроническом воздействии на здоровье населения.
3. Осуществлены расчеты рисков здоровью населения, обусловленных хронической интоксикацией и немедленным действием ряда загрязняющих веществ.
4. Выявлен вклад загрязняющих веществ в формирование показателей риска здоровью населения.

Материалы и методы. В основу исследования были положены данные о фактических концентрациях ряда аэрополлютантов, полученные на стационарных постах наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха ФГБУ «Северо-Кавказское управление гидрометеорологической службы» за 2017–2021 годы [5]. С 2017 года в Новочеркасске начали функционировать три стационарных поста, которые в данном исследовании обозначены как посты I, II, III. Пост I расположен в центральной части города, на пересечении автомагистралей. Пост III находится в зоне воздействия промышленных предприятий. Пост II также расположен в пределах зоны воздействия промышленных предприятий, на пересечении автомагистралей.

В связи с недостаточным количеством постов наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха рекомендуется создание еще двух дополнительных постов, один из которых, условно обозначенный как пост 1, предлагается разместить в селитебной зоне на улице Петровской, 1. Для мониторинга загрязнения атмосферного воздуха вблизи Новочеркасской ГРЭС предлагается создание поста в микрорайоне «Донской», условно обозначенного как пост 2. Действующие стационарные посты наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха (указаны в работе как номера I, II, III) и рекомендуемые для создания посты наблюдения за состоянием воздушного бассейна города (обозначены в работе как номера 1, 2) представлены на рис. 1.

[3] *О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году.* Государственный доклад. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2021_/?ysclid=lwoteqy14b321565566 (дата обращения: 19.04.2024).

В соответствии с целью исследования была рассчитана кратность превышения среднегодовых и максимально разовых концентраций анализируемых аэрополлютантов, соответствующих предельно гигиенически допустимым нормативам. Уровень загрязнения наружного воздуха исчислялся с помощью показателя Р[4].

Расчет показателя Р проводился по формуле:

$$P = \sqrt{\sum K_I^2}, \qquad (1)$$

где *K* — кратность превышения ПДК веществ различных классов опасности, приведенных к третьему классу.

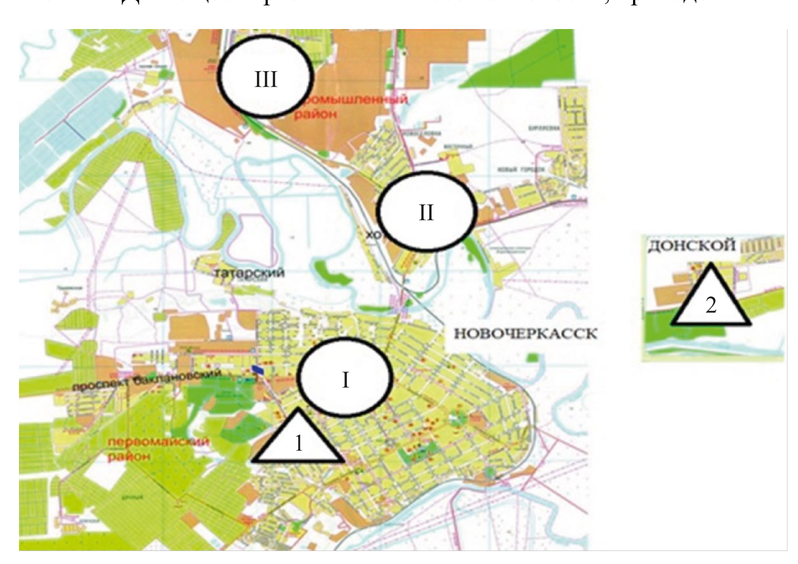


Рис. 1. Посты наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха на территории города Новочеркасска[5]

Выбор неканцерогенных эффектов в качестве показателей риска был обусловлен перечнем вредных веществ неканцерогенного действия[6], концентрации которых отслеживаются на стационарных постах наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха Новочеркасска.

В качестве основного метода оценки риска использовался метод расчета коэффициентов и индексов неканцерогенных эффектов при хроническом и остром воздействии [6, 7]. В качестве дополнительной процедуры определялись риски хронической интоксикации и немедленного действия[7].

Результаты исследования. Повышенные объемы выбросов автотранспорта и промышленных предприятий приводят к опасному загрязнению атмосферного воздуха Новочеркасска. Так, за период с 2017 по 2021 год оказались превышены среднегодовые концентрации взвешенных веществ, диоксидов азота, оксидов углерода, формальдегида, оказывающих на здоровье населения как канцерогенные, так и неканцерогенные воздействия. Наибольшие при этом кратности превышения ПДК сс за исследуемый промежуток времени были выявлены в отношении среднегодовых концентраций взвешенных веществ (от 1,8 до 6 ПДК), формальдегида (от 0,7 до 2,7 ПДК), диоксидов азота (от 0,4 до 2,2 ПДК), оксидов углерода (от 0,63 до 2,17 ПДК).

Важно отметить, что наибольшие кратности превышений максимально разовой ПДК мр были выявлены также в случае взвешенных веществ и окиси углерода, составив 2,0–13,2 ПДК и 1,25–10,0 ПДК соответственно. Превышение в приземном слое воздуха города ПДК мр формальдегида достигало 1,44–3,74, диоксидов азота — 0,45–1,85. Среднегодовые и максимально разовые концентрации сернистого газа и оксидов азота за изучаемый временной интервал, как показали проведенные исследования, не превышали значений соответствующих ПДК.

На основе учета среднегодовых концентраций оцениваемых веществ были вычислены значения комплексного параметра *P*, составившие за указанный период 4,0–5,0, что позволило сделать вывод о наличии опасного уровня загрязнения приземного воздуха.

Расчеты параметра *P*, выполненные с помощью учета максимально разовых концентраций исследуемых в работе веществ, позволили выявить вызывающий опасения уровень загрязнения приземного слоя, поскольку значения параметра *P* составили 22,0–28,5.

[4] Р 2.1.10.192–04. *Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду*. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200037399 (дата обращения: 28.03.2024).
[5] *Экологический вестник Дона*. URL: https://xn--d1ahaoghbejbc5k.xn--p1ai/about/projects/all/19/?ysclid=lwotyc7mh7723274679 (дата обращения: 28.03.2024).
[6] Р 2.1.10.192-04. *Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200037399 (дата обращения: 28.03.2024).
[7] *Cancer. World Health Organization* (April 21, 2024). Retrieved from https://www.who.int/health-topics/cancer#tab=tab_1 (дата обращения: 28.03.2024).

В пределах поста II были выявлены наибольшие значения параметра *P*, оцененные по среднегодовым и максимально разовым концентрациям загрязняющих веществ, рассматриваемых в данном исследовании. Как показал анализ значений индексов риска хронического воздействия, рассчитанных в работе, в зависимости от местоположения поста наблюдений их величины изменялись от 33,5 до 37,1. Диапазон значений индекса острого воздействия составлял 15,9–22,6.

Как показывают данные медицинской статистики, наиболее уязвимы к острому и хроническому воздействию органы дыхания и вся дыхательная система. В частности, доля нарушений со стороны органов дыхания составила от 38,22 до 42,37 %. Вклад указанных выше угроз и сбоев в работе дыхательной системы человека в общий уровень индекса острого воздействия достиг максимальных значений — от 45,47 до 49,81 %. Поэтому вполне очевидно, что повышенный уровень загрязнения приземного слоя воздуха в большей мере обеспечивает риск острого воздействия, что не противоречит как теоретическим построениям, так и практическим расчетам.

Величина суммарного риска хронической интоксикации изменялась в зависимости от расположения поста наблюдения — от 0,24 до 0,28. Уровень риска хронической интоксикации, как показали расчеты, в основном формировался за счет концентраций взвешенных веществ, вклад которых обусловил широкий диапазон значений (от 35,27 до 47,81 %) в зависимости от точки расположения поста наблюдения сети экологического мониторинга атмосферного воздуха. Существенные величины максимального риска отдельной примеси обусловили высокие значения уровня суммарного риска немедленного действия выявленных в составе рассматриваемых в исследовании загрязняющих веществ.

Интересно отметить, что в пределах постов наблюдений I и II, расположенных вблизи автомагистралей, величина суммарного риска немедленного действия обеспечивалась значительным уровнем максимального риска в отношении концентраций взвешенных веществ, достигнув значений 0,58 и 0,69 соответственно.

Вблизи поста III высокие концентрации оксида углерода, обусловив значительный уровень максимального риска, привели к росту значений суммарного риска до 0,58.

Результаты анализа загрязнения воздушного пространства Новочеркасска были сопоставлены с данными мониторинга загрязнения приземного слоя воздуха Ростова-на-Дону по тому же спектру загрязняющих веществ и в течение 2017–2021 годов.

Оценка уровня загрязнения воздуха Ростова-на-Дону производилась на основе анализа данных расположенных в разных районах города трех постов наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха Федерального государственного бюджетного учреждения «Северо-Кавказское управление гидрометеорологической службы» (посты 51, 52, 55), имевших наиболее репрезентативный спектр учитываемых веществ [8].

Так, пост 51 расположен в центральной части Ростова-на-Дону, на пересечении автомагистралей с насыщенным движением; пост 52 приближен к зоне расположения промышленных предприятий; пост 55 расположен в селитебном районе города.

В таблице 1 представлены результаты сравнительной оценки уровней загрязнения воздушного пространства урбанизированных и индустриальных территорий Новочеркасска и Ростова-на-Дону за 2017–2021 годы. Показатели, иллюстрирующие уровень загрязнения воздуха, оказались в Новочеркасске более чем в 1,5 раза выше, чем в Ростове-на-Дону.

В Ростове-на-Дону вклад взвешенных веществ в риск здоровью немедленного действия оказался на 24 % больше, чем в Новочеркасске. Однако в Новочеркасске вклад концентрации оксида углерода в данный вид риска был в 2,5 раза существеннее, чем в Ростове-на-Дону [9].

Таблица 1

Оценка уровней загрязнения атмосферного воздуха Новочеркасска и Ростова-на-Дону

Показатель	г. Новочеркасск	г. Ростов-на-Дону
Параметр *P* по среднегодовым концентрациям	4,42	2,63
Параметр *P* по максимальным концентрациям	24,59	23,52
Индекс опасности при хроническом воздействии	35,70	24,34
Индекс опасности при остром воздействии	19,47	20,94
Риск хронической интоксикации	0,25	0,18
Риск немедленного действия	0,61	0,53

Результаты оценки вклада различных аэрополлютантов в риск немедленного действия представлены на рис. 2 и 3.

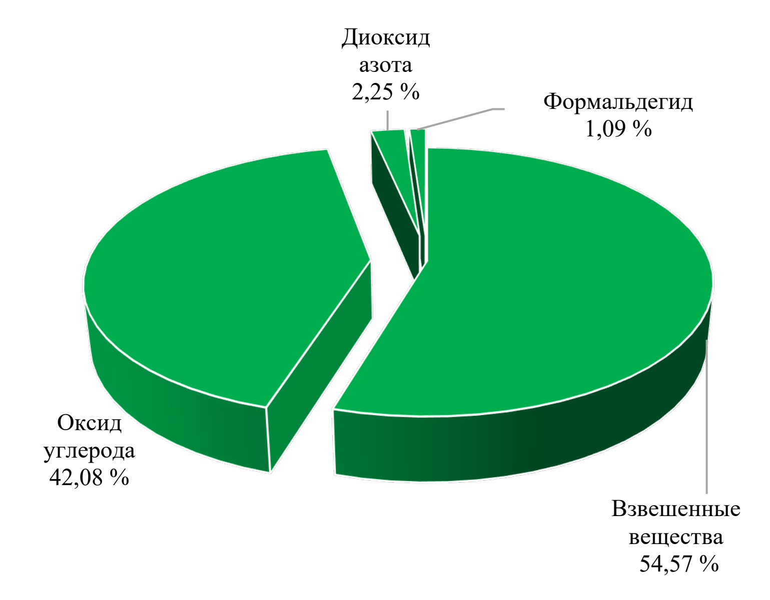


Рис. 2. Вклад загрязняющих веществ в риск немедленного действия для здоровья населения Новочеркасска

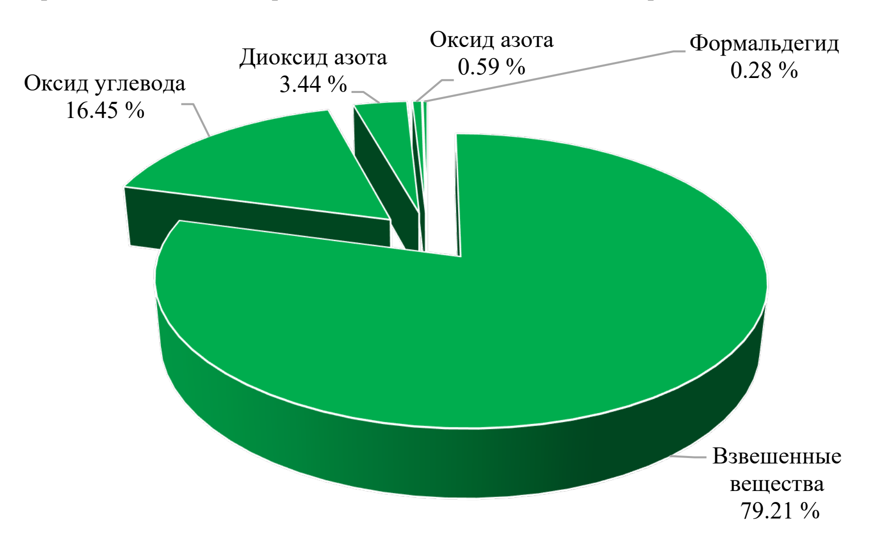


Рис. 3. Вклад загрязняющих веществ в риск немедленного действия для здоровья населения Ростова-на-Дону

Между тем, существенных различий между двумя городами по вкладу загрязнителей в риск хронической интоксикации не выявлено.

Обсуждение и заключение. Как показали проведенные расчеты, а также оценка и анализ полученных в данном исследовании результатов, опасный для здоровья населения Новочеркасска уровень загрязнения приземного слоя воздуха обеспечивается не только весьма существенными выбросами промышленных предприятий и автотранспорта, но и совокупностью таких факторов природного и антропогенного характера, как недостаточное количество осадков на фоне высокой повторяемости метеорологических процессов, способствующих аккумуляции антропогенных примесей в приземном слое, при снижении доли зеленых насаждений, включая городские леса и парковые зоны [10].

В числе наиболее значимых итогов исследования можно выделить следующие:

1. Состояние приземного слоя воздуха в пределах Новочеркасск неблагоприятное, поскольку установленные уровни загрязнения превышали допустимые санитарно-гигиенические нормативы. Наиболее высокую опасность здоровью населения города представляют присутствующие в приземном слое взвешенные вещества и оксиды углерода.

2. Анализ результатов расчетов показателя *P* в пределах Новочеркасска позволил установить опасный уровень загрязнения воздушного пространства. При этом кумуляция загрязняющих веществ в атмосфере Ростова-на-Дону оценивается как вызывающая опасение.

3. Воздействие загрязненного атмосферного воздуха может вызвать симптомы хронической интоксикации у 240–280 человек из тысячи, при достижении максимальных концентраций аэрополлютантов в наружном воздухе Новочеркасска от 579 до 692 человек из тысячи жителей могут испытывать неблагоприятные рефлекторные реакции.

4. Наиболее опасный характер имеет загрязнение воздушного пространства Новочеркасска, отмеченное в пределах поста II, находящегося на пересечении автомагистралей и приближенного к зоне воздействия промышленных предприятий.

5. В связи с опасным для здоровья уровнем загрязнения атмосферного воздуха рекомендуется расширение площади зеленых насаждений и создание двух дополнительных постов мониторинга загрязнения атмосферного пространства: в селитебной зоне города и вблизи Новочеркасской ГРЭС, в микрорайоне «Донской».

Список литературы / References

1. Рахманин Ю.А., Михайлова Р.И. Окружающая среда и здоровье: приоритеты профилактической медицины. *Гигиена и санитария*. 2014;93(5);5–10.

Rakhmanin YuA, Mikhaylova RI. Environment and Health: Priorities for Preventive Medicine. *Hygiene and Sanitation*. 2014;93(5);5–10. (In Russ.)

2. Андреев С.С. *Интегральная оценка климатической комфортности на примере территории Южного федерального округа России*. Санкт-Петербург: Российский государственный гидрометеорологический университет; 2011. 302 с. URL: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_23963a035bf3491da5cc5a42d941e7d6.pdf (дата обращения: 23.05.2024).

Andreev SS. *Integral Assessment of Climatic Comfort on the Example of the Territory of the Southern Federal District of Russia*. Saint Petersburg: Russian State Hydrometeorological University; 2011. 302 p. URL: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_23963a035bf3491da5cc5a42d941e7d6.pdf (accessed: 23.05.2024). (In Russ.)

3. Киселев А.В., Щербо А.П., Кислицын В.А., Новиков С.М. Сравнительный анализ расчетных методов определения средних ингаляционных экспозиционных нагрузок при оценке риска здоровью. *Гигиена и санитария*. 2006;1;42–44.

Kiselev AV, Shcherbo AP, Kislitsin VA, Novikov SM. Comparative Analysis of Methods for Calculating the Average Inhalational Exposure Loads in the Assessment of Health Risk. *Hygiene and Sanitation*. 2006;1;42–44. (In Russ.)

4. Щербо А.П. Мельцер А.В., Киселев А.В. *Оценка риска воздействия производственных факторов на здоровье работающих*. Санкт-Петербург: Терция; 2005. 115 с. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01002854973 (дата обращения: 23.05.2024).

Shcherbo AP, Meltser AV, Kiselev AV. *Assessment of the Risk of the Impact of Production Factors on the Health of Workers*. St. Petersburg: Tertsiya; 2005. 115 p. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01002854973 (accessed: 23.05.2024). (In Russ.)

5. Андреева Е.С., Климов П.В., Штенске К.С. Загрязнение атмосферного воздуха как один из факторов неканцерогенного риска здоровью населения города Ростова-на-Дону. *География и природные ресурсы*. 2021;42(1):42–48. https://doi.org/10.15372/GIPR20210105

Andreeva ES, Klimov PV, Shtenske KS. Atmospheric Air Pollution as One of the Factors of the Non-Carcinogenic Risk to Human Health in Rostov-on-Don. *Geography and Natural Resources*. 2021;42(1):42–48. https://doi.org/10.15372/GIPR20210105 (In Russ.)

6. Андреева Е.С., Климова Д.Н. Оптимизация системы мониторинга загрязнения атмосферного воздуха в обеспечении экологической безопасности крупных городов. *Успехи современного естествознания*. 2023;6:40–46. https://doi.org/10.17513/use.38051

Klimova DN, Andreeva ES. Optimization of the Monitoring System of Atmospheric Air Pollution in Ensuring the Environmental Safety of Large Cities. *Advances in current natural sciences*. 2023;6:40–46. https://doi.org/10.17513/use.38051 (In Russ.)

7. Селегей ТС. Разработка усовершенствованного комплексного метеорологического показателя рассеивающий способности атмосферы. *Отчет о научно-исследовательской работе. по теме 1.43.15.* Новосибирск: СибНИГМИ; 2014. 131 с.

Seleguei TS. *Development of an Improved Integrated Meteorological Measure the Scattering Power of the Atmosphere*. Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote po teme 1.43.15. Novosibirsk: FGBU SibNIGMI, 2014. 131 p. (In Russ.)

8. Wild CP, Weiderpass E, Stewart BW (Eds.). World Cancer Report: Cancer Research for Cancer Prevention. 2021. URL: https://shop.iarc.fr/products/world-cancer-report-cancer-research-for-cancer-prevention-pdf (accessed: 23.05.2024).

9. Denisov OV, Bulygin YuI, Ponomarev AE, Ponomareva LA, Lebedeva VV. Innovative Solutions Shockproof Protection in Occupations Associated with an Increased Risk of Injury. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017;50(1):012044. https://doi.org/10.1088/1755-1315/50/1/012044

10. Bulygin YuI, Zharkova MG, Alekseenko LN. Aerodynamical Probation of Semi-Industrial Production Plant for Centrifugal Dust Collectors' Efficiency Research. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017;50(1);012002. https://doi.org/10.1088/1755-1315/50/1/012002

Об авторах:

Петр Валерьевич Климов, кандидат биологических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и защиты окружающей среды Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 8088-6868, ORCID, ResearcherID, ScopusID

Елена Сергеевна Андреева, доктор географических наук, доцент, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности и защиты окружающей среды Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 2056-7152, ORCID, ResearcherID, ScopusID, meteo0717@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

П.В. Климов: обсуждение основной концепции и полученных результатов, доработка текста, выводов.

Е.С. Андреева: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов, оформление.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Petr V. Klimov, Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor of the Life Safety and Environmental Protection Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code: 8088-6868, ORCID, ResearcherID, ScopusID

Elena S. Andreeva, Dr. Sci. (Geog.), Associate Professor, Professor of the Life Safety and Environmental Protection Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code: 2056-7152, ORCID, ResearcherID, ScopusID, meteo0717@yandex.ru

Claimed Contributorship:

PV Klimov: discussion of the basic concept and the results, revision of the text and conclusions.

ES Andreeva: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study, calculations, preparation of the text, formulation of conclusions, design.

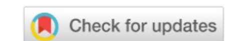
Conflict of Interest Statement: **the authors do not have any conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 06.06.2024
Поступила после рецензирования / Revised 28.06.2024
Принята к публикации / Accepted 14.07.2024

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY





УДК 519.6:616-036.2 *Оригинальное эмпирическое исследование*
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-57-66

Уточнение прогноза заболеваемости COVID-19 с наложением на сезонные вспышки гриппа


EDN: PTULTJ

Н.Н. Азимова, Д.Х. Заирова ✉, А.С. Ермаков, Е.Н. Ладоша
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ gulyazair@gmail.com

Аннотация

Введение. Появление новых трансмиссивных заболеваний требует разработки соответствующих лечебных регламентов, мер предупреждения болезни, схем реабилитации и т. д. Важнейшим элементом всех обозначенных выше мероприятий является своевременность, которая невозможна без надёжного прогнозирования эпидемической обстановки. Фактически эпидемическая ситуация может обостриться при наложении двух эпидемий, что актуализует прогнозирование соответствующих временных интервалов. Цель данной работы — научно обоснованное предсказание периодов, отвечающих наложению эпидемий традиционного гриппа и вновь появившегося COVID-19.

Материалы и методы. Научные изыскания основываются на анализе статистических данных. Для изучения и прогнозирования процессов использованы техники Фурье-разложения и авторегрессии. Скорректирована оригинальная математическая модель динамики COVID-19 с учетом новых статистических данных. Сопоставлены результирующие масштабно-временные и случайные характеристики COVID-19 в рамках модели с известными параметрами традиционного гриппа.

Результаты исследования. Установлено, что динамика эпидемии COVID-19 имеет ярко выраженный сезонный характер с периодичностью три раза в год. Выявлено, что алгоритм прогноза заболеваемости COVID-19 методом Фурье-разложения не является надежным, однако позволяет хорошо описать наблюдаемую динамику развития эпидемии. Авторегрессионный анализ подходит лишь для краткосрочного прогнозирования коронавирусной эпидемии. Сопоставлены особенности течения двух заболеваний сезонного характера — COVID-19 и гриппа. Спрогнозированы моменты, когда их совместное действие на человека окажется особенно пагубным.

Обсуждение и заключения. Все методы математического анализа убедительно доказали, что периодичность вспышек COVID-19 — трижды в год, а гриппа — ежегодно. В периоды, когда действия двух вирусов (коронавируса и гриппа) накладываются, следует быть особо осторожными и соблюдать меры, направленные на снижение риска заболеть сезонной вирусной инфекцией, в том числе проводить регулярную вакцинацию.

Ключевые слова: эпидемия, пандемия, COVID-19, эпидемиологические характеристики вируса, противодействие распространению COVID-19, математическая модель эпидемического процесса, омикрон

Благодарности. Авторы выражают особую благодарность консультанту научного проекта О.В. Яценко, доценту, кандидату физико-математических наук, который внес немаловажный вклад в сопоставление характеристик вирусов гриппа и COVID-19 и дал ценные замечания при оформлении данной работы.

Для цитирования. Азимова Н.Н., Заирова Д.Х., Ермаков А.С., Ладоша Е.Н. Уточнение прогноза заболеваемости COVID-19 с наложением на сезонные вспышки гриппа. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(3):57–66. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-57-66

Original Empirical Research

Update of the COVID-19 Incidence Forecast with the Overlap of Seasonal Flu Outbreaks

Natalya N. Azimova, Dzhakhangul Kh. Zairova ✉, Aleksandr S. Ermakov, Evgenii N. Ladosha
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ gulyazair@gmail.com

Abstract

Introduction. The emergence of new vector-borne diseases necessitates the development of adequate medical regulations, prevention measures, rehabilitation programs, etc. Among all these measures, timeliness is the most crucial element, which cannot be achieved without reliable forecasting of the epidemic situation. In fact, the situation can deteriorate when two epidemics occur simultaneously, emphasizing the need for predicting the corresponding time intervals accurately. The aim of this study is to scientifically predict the periods when traditional influenza and COVID-19 epidemics may overlap.

Materials and Methods. The scientific research was based on the analysis of statistical data, which was processed using Fourier decomposition and autoregression techniques to study and predict various processes. The original mathematical model of COVID-19 dynamics was adjusted with new statistical data. The resulting scale-time and random characteristics of COVID-19 within the model were compared with known parameters of traditional influenza.

Results. It was established that the dynamics of the COVID-19 epidemic had a pronounced seasonal character with a frequency of three times a year. It was found that the method of forecasting COVID-19 incidence using Fourier decomposition was not reliable, but it allowed for a good description of the observed dynamics of the epidemic. Autoregressive analysis, on the other hand, was only suitable for short-term forecasting of coronavirus epidemics. The features of the two seasonal diseases, COVID-19 and influenza, have been compared, and the moments when their combined effects on a person would be particularly harmful have been predicted.

Discussion and Conclusion. All methods of mathematical analysis have convincingly demonstrated that the frequency of COVID-19 outbreaks occurs three times per year, while influenza occurs annually. During times when the activities of both viruses (coronavirus and influenza) coincide, special attention should be paid and measures taken to reduce the risk of contracting a seasonal viral infection, including through regular vaccination.

Keywords: epidemic, pandemic, COVID-19, epidemiological characteristics of the virus, counteracting the spread of COVID-19, mathematical model of epidemic process, omicron

Acknowledgements. The authors would like to express their special gratitude to Associate Professor, Cand. Sci. (Phys.-Math.) O.V. Yatsenko, who made an important contribution to the comparison of the characteristics of influenza and COVID-19 viruses. His comments were essential in the design and development of this research.

For citation. Azimova NN, Zairova DKh, Ermakov AS, Ladosha EN. Update of the COVID-19 Incidence Forecast with the Overlap of Seasonal Flu Outbreaks. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(3):57–66. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-57-66

Введение. Пагубное воздействие эпидемий на человека и его жизнедеятельность в целом пытаются предотвращать постоянно совершенствуемыми комплексами предупредительных мер. Элементы этих комплексов нацелены на разрыв цепочек распространения заболевания, уменьшение его тяжести и снижение риска заражения. Особенно тщательно все эти элементы проработаны для сезонных вирусных заболеваний, в частности, ОРВИ и гриппа. Появление новых трансмиссивных заболеваний требует разработки соответствующих комплексов (лечебных регламентов, мер предупреждения заболеваемости, схем реабилитации, лекарственных средств, специализированных лечебных учреждений и т. д.). Наглядным примером здесь служит недавняя пандемия COVID-19 и соответствующая реакция на неё мировых правительств и системы здравоохранения [1]. Важнейшим элементом всех обозначенных выше мероприятий является своевременность, которая невозможна без надёжного прогнозирования эпидемической обстановки.

Цель данной работы в связи с этим — определение периодов наложения эпидемий традиционного гриппа и вновь появившегося COVID-19. Это позволит подготовиться к ним, минимизировать остроту заболеваний и их последствия.

Материалы и методы. Появление новых эпидемических данных за период с 23.09.2021 по 03.03.2023 требует кардинального пересмотра предполагаемого ранее сценария развития заболевания. В частности, бывший сценарий предполагал, что пандемия останется с человечеством навсегда, характеризуясь средним уровнем заболевших в 600 тыс. чел. в сутки при колебаниях с частотой три раза в год и амплитудой 300 тыс. чел. Этот результат соответствовал так называемому пессимистичному сценарию. Но появление новых штаммов обеспечило взаимную при-

способленность вируса и человека, что направило динамику COVID-19 в оптимистичное русло. Данное обстоятельство требует корректировки математической модели для правильного предсказания времени и масштаба вспышек заболевания [2, 3]. В рамках такой корректировки предстоит решить следующие задачи:

1. уточнить результаты параметрической идентификации внешней модели по новым фактическим данным [4];
2. оценить влияние регулярной составляющей и случайных факторов на динамику пандемии;
3. составить прогноз эпидемической ситуации как на основе регулярно-стохастической (скорректированной по новым данным) модели, так и по новыми алгоритмам — Фурье-анализом и авторегрессией;
4. сопоставить результирующие масштабно-временные и случайные характеристики COVID-19 в рамках модели с известными параметрами традиционного гриппа.

В качестве шаблонной функции, описывающей динамику COVID-19, принимаем

$$\Phi(t,A,B,C,D,E,F,\alpha,\beta,\gamma,\delta,\varepsilon)=\frac{A\left[\alpha+cos(\beta t+\gamma)\right]}{ch^2(Bt+C)}+D\left[1+th(Et+F)\right]\left(\delta+cos(\delta t+\varepsilon)\right). \quad (1)$$

Первое слагаемое этой функции отвечает высокому одиночному пику, вызванному штаммом омикрон. Второе слагаемое — сценарию логистического выхода заболеваемости на некоторый средний уровень в 500 тыс. чел. при колебаниях вокруг этого значения с частотой β/(2π). Входящие в уравнение (1) параметры имеют очевидный смысл продолжительности, частоты, амплитуды и начальной фазы отдельных мод заболевания.

Для отыскания всех параметров модели (1) по уточненным данным ВОЗ за период с 01.04.2022 по 03.03.2023 решалась существенно нелинейная задача математического программирования:

$$\text{ЦФ}=\Sigma_i\left(lg\,\Phi(t_i,A,B,C,D,E,F,\alpha,\beta,\gamma,\delta,\varepsilon)-lg\,\Phi_i\right)^2\rightarrow min. \quad (2)$$

Результаты параметрической идентификации (1) приведены в таблице 1 и на рис. 1.

Таблица 1

Числовые характеристики шаблонной модели заболеваемости COVID-19

A	B	C	D	E	F	α	β	γ	δ	ε	ЦФ
4381,458	0,036	–25,085	58,159	0,009	–1,280	1,233	0,043	–1,827	4,346	1,767	23,640

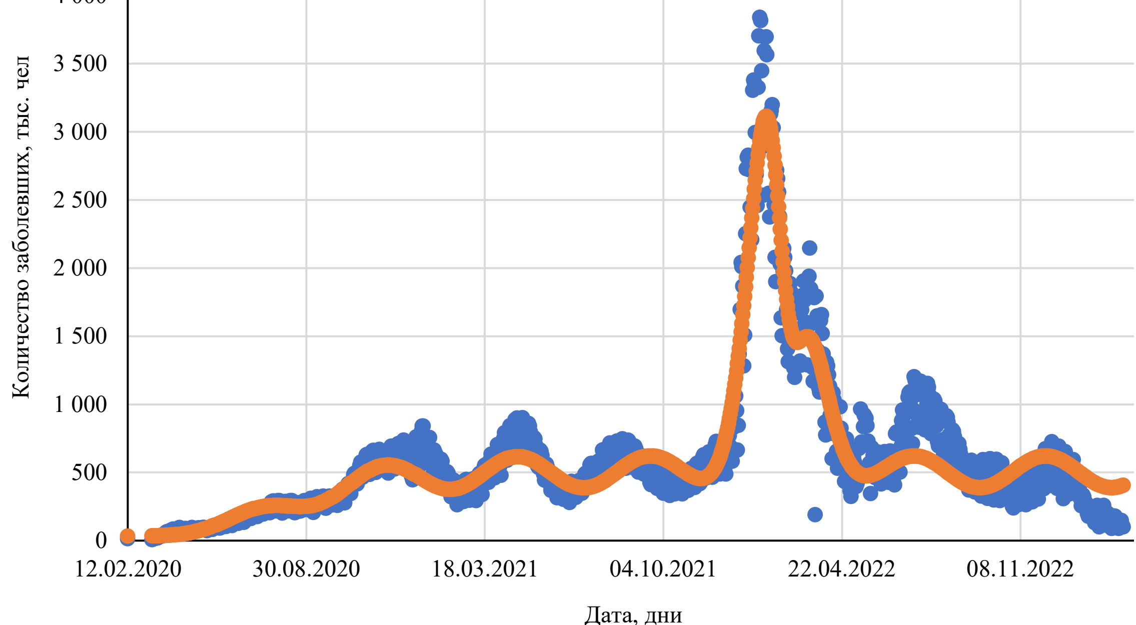


Рис. 1. Результаты вычислений количества заболевших по датам

В соответствии с проведенными вычислениями формула (1) принимает вид:

$$\Phi(t)=\left(\frac{4\,381{,}458\left[1{,}233+cos(0{,}043t-1{,}827)\right]}{ch^2 0{,}036t-25{,}085}\right)58{,}159\left[1+th(0{,}009t-1{,}280)\right]\left(4{,}346+cos(0{,}043t+1{,}767)\right). \quad (3)$$

Период колебаний составил 147 дней против 120–125 в предыдущей версии модели [2]. Однако такое увеличение представляется артефактом (рис. 1) и является результатом сбоя фазы заболеваемости при вспышке омикрона. Величина (γ – ε) характеризует сдвиг фазы между заболеваемостью традиционным COVID-19 и омикрон-модификацией.

Исключение из данных тренда и колебательной составляющей не позволило получить чисто шумовой фон (рис. 2) [5]. Это объясняется наличием в действительности некоторого нелинейного взаимодействия, которое не укладывается в рамки модели (3).

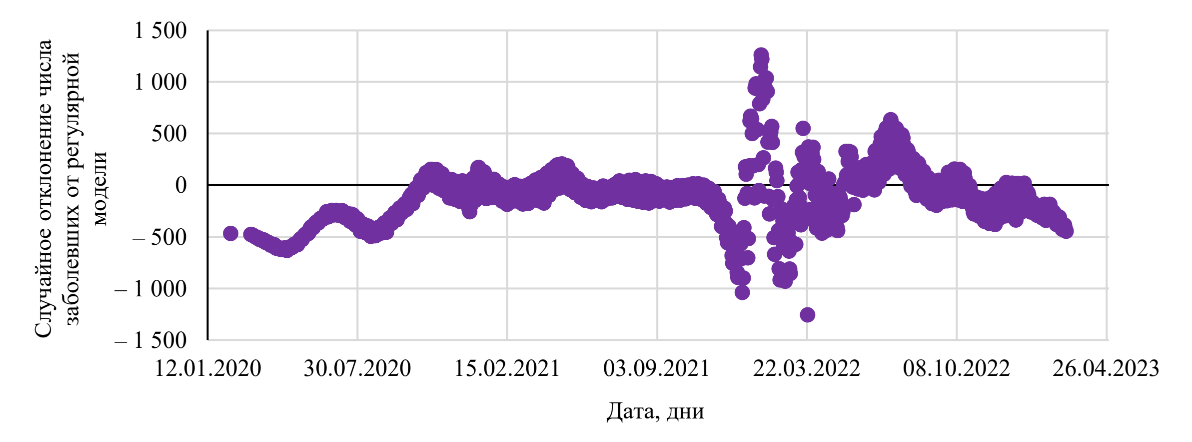


Рис. 2. Погрешность аппроксимации данных ВОЗ моделью (3)

Невозможность аккуратно описать динамику COVID-19 11-параметрической функцией (1) побуждает применить для этой цели альтернативные подходы.

Результат представления наблюдаемой динамики эпидемии при помощи Фурье-разложения, включающего 40 и 100 гармоник, показан на рис. 3.

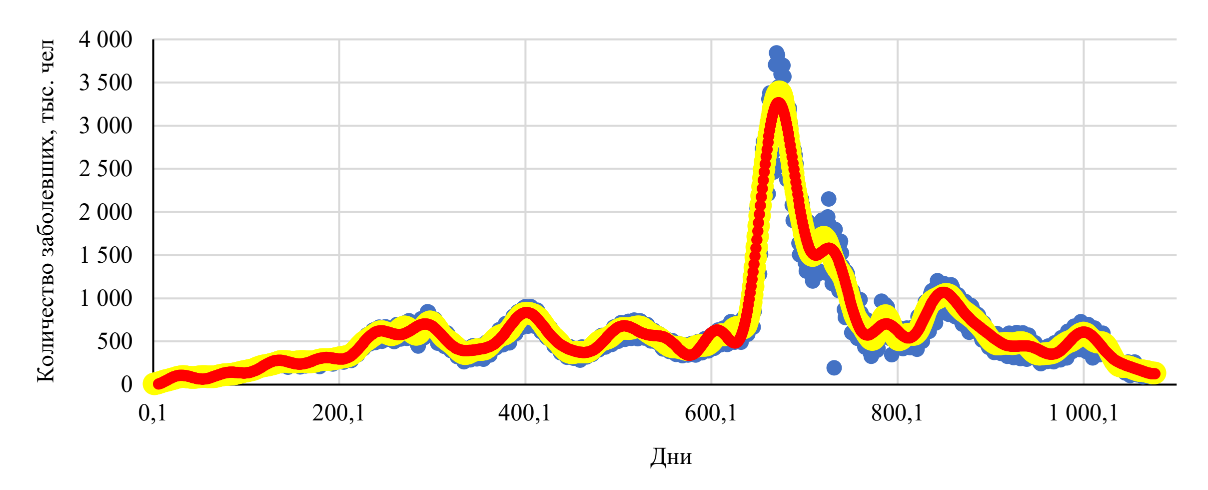


Рис. 3. Исходная динамика эпидемии и ее Фурье-аппроксимация. Голубым цветом изображены исходные данные, желтым — Фурье-разложение на 100 гармоник, красным — Фурье-разложение на 40 гармоник

Сопоставление данных рис. 1 и рис. 3 свидетельствует, что учет большего числа мод позволяет лучше описать реальную динамику эпидемии. Сказанное подтверждается как медленным убыванием коэффициентов a_i в разложении (рис. 4), так и более дисперсным характером оставшейся случайной составляющей (рис. 5).

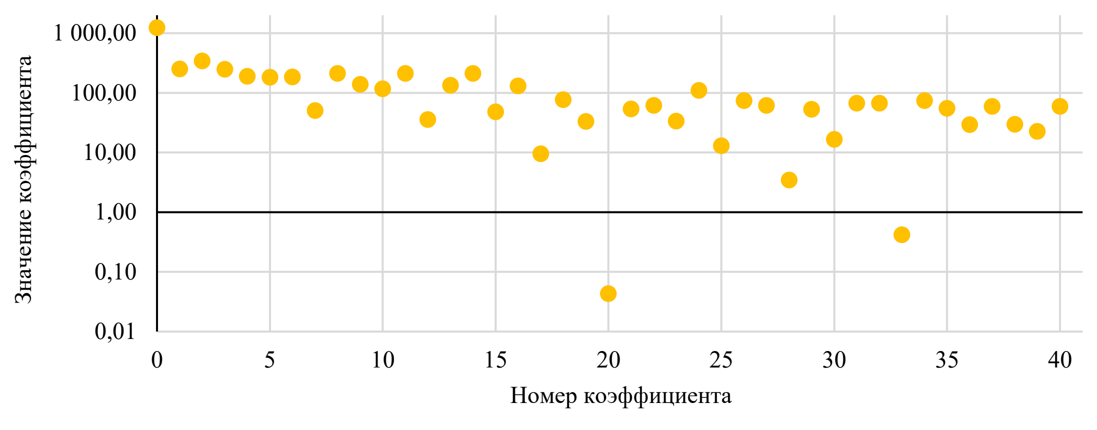


Рис. 4. Изменение коэффициентов разложения a_i по мере возрастания номера

Величина отклонения, усл. ед.

Количество дней

а)

Величина отклонения, усл. ед

Количество дней

б)

Рис. 5. Результат отсева Фурье-образа из исходных данных:
а — Фурье-разложение на 40 гармоник; *б* — Фурье-разложение на 100 гармоник

В соответствии с данными рис. 5 остаточный относительный шум носит случайный характер. Практически знание коэффициентов Фурье-разложения a_i [6] позволяет синтезировать регулярно-случайную функцию для прогнозирования [7]. Чтобы результат выглядел прозрачней, в прогнозной линии (на рис. 6 — коричневый цвет) оставляется лишь тренд и результат сопоставляется с новыми статистическими данными [8]. Сопоставление говорит о том, что предложенный алгоритм не обеспечивает долгосрочного прогноза [9].

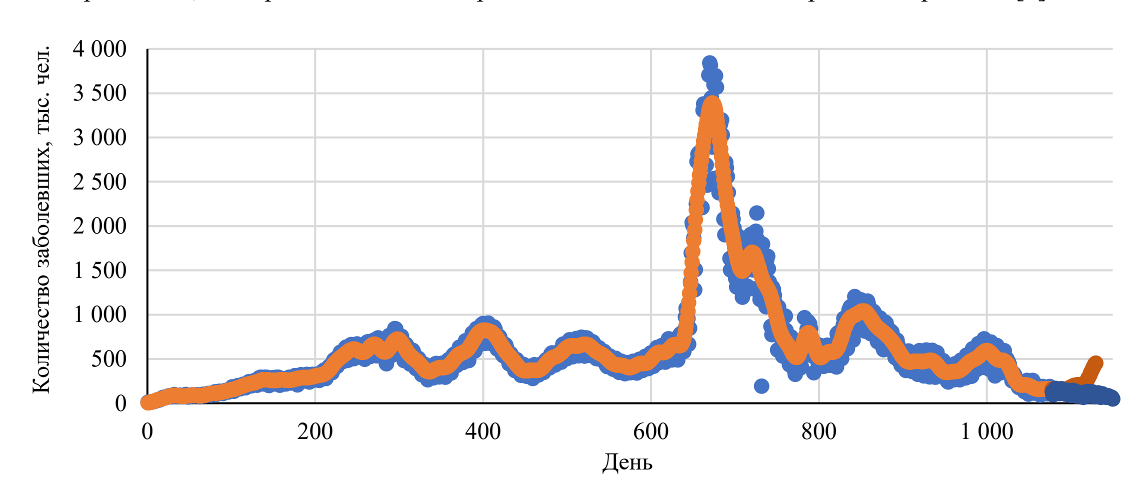


Рис. 6. Прогноз эпидемической обстановки на основе Фурье-разложения в сопоставлении с новыми данными ВОЗ.
Оранжевым цветом обозначается модель, основанная на Фурье-разложении временного ряда;
коричневым — прогнозируемое развитие коронавируса; голубым — исходные данные;
синими — сопоставляемые прогнозируемым значениям реальные данные

В этой связи исследована возможность повышения качества прогнозирования на основе авторегрессионного подхода. Процедура авторегрессии регламентируется следующим алгоритмом:

1) инициализация исходных данных;
2) в зависимости от характеристик временного ряда и требований прогноза выбирается подходящая модель;
3) обучение модели на обучающей выборке;
4) валидация модели (проверка качества прогноза на тестовой выборке);
5) прогнозирование.

Спрогнозирована динамика эпидемии с 04.03.2023 до настоящего времени с сопоставлением результата с актуальными данными ВОЗ [6–8]. Результат сопоставления приведен на рис. 7. Видно, что техника авторегрессии также пригодна лишь как инструмент краткосрочных прогнозов.

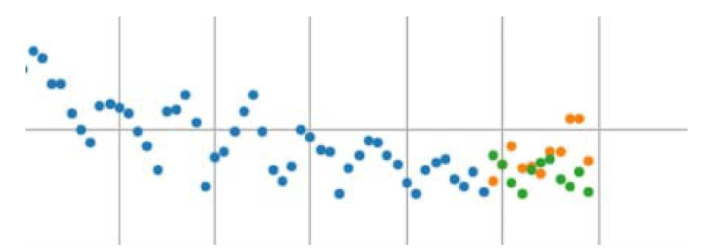


Рис. 7. Прогноз эпидемической обстановки на основе метода авторегрессии в сопоставлении с новыми данными ВОЗ. Голубыми точками обозначены исходные данные; оранжевыми — спрогнозированные значения; зелеными — сопоставляемые прогнозируемым значениям реальные данные

Ввиду того, что COVID-19 быстро эволюционировал в сезонное вирусное заболевание, интересно сопоставить его эпидемические характеристики с таковыми для гриппа, а также проанализировать совместное воздействие двух вирулентных заболеваний на человеческую популяцию.

Для успешного сопоставления характеристик эпидемий COVID-19 и гриппа были использованы статистические данные по заболеваемости гриппом в мировом масштабе с 03.01.2000 по 20.03.2023, которые представлены на ресурсе[1] и изображены на рис. 8.

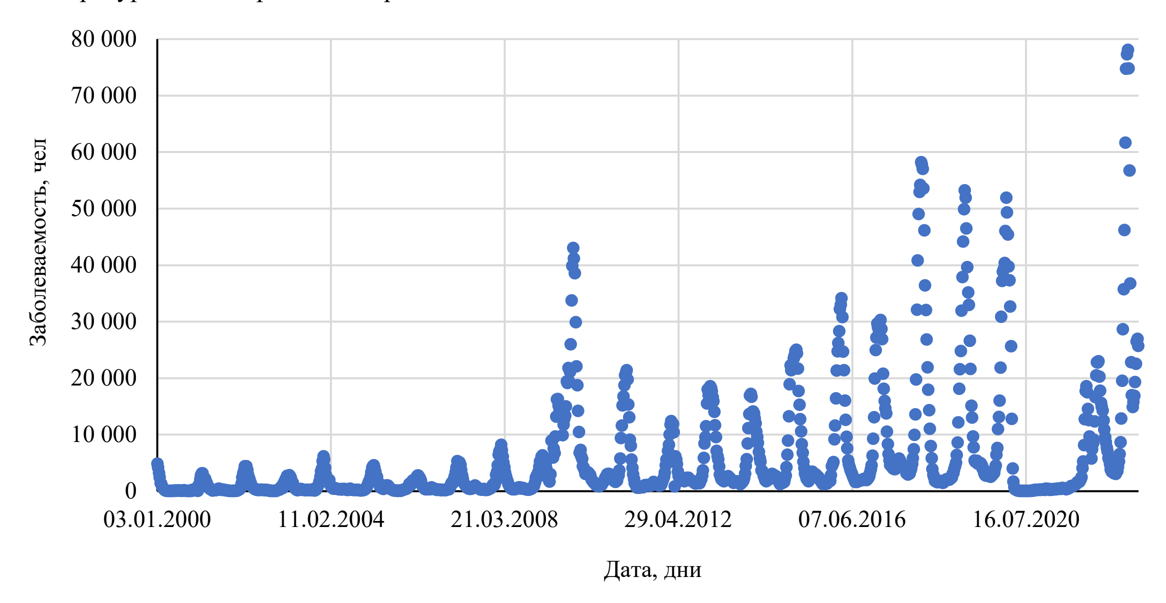


Рис. 8. Фактические данные по заболеваемости гриппом согласно данным ВОЗ

В качестве модели тренда для эпидемии гриппа использована логистическая зависимость [10] (рис. 9):

$$N(t) = \frac{\mu \cdot e^{\eta(t-\chi)}}{1 + e^{\eta(t-\chi)}}. \qquad (4)$$

Инициализация модели методами математического программирования дает следующие значения параметров: $\mu = 6\,847$ тыс. чел/день (предельный средний уровень заболеваемости гриппом); $\eta = 0{,}29$ год$^{-1}$ (темп увеличения охвата заболевших мировой системой контроля заболеваемости); $\chi = 2\,013{,}9$ год (момент половинного охвата заболевших системой учета). В рамках этой трендовой модели заболеваемость гриппом выходит на историческое плато, а ее регистрируемый рост связан исключительно с информатизацией в здравоохранении.

[1] Influenza lab. surveillance information Virus detections by subtype reported to FLUNET. Sci. Rept. URL: https://goo.su/z4uULuF (дата обращения: 25.05.2024).

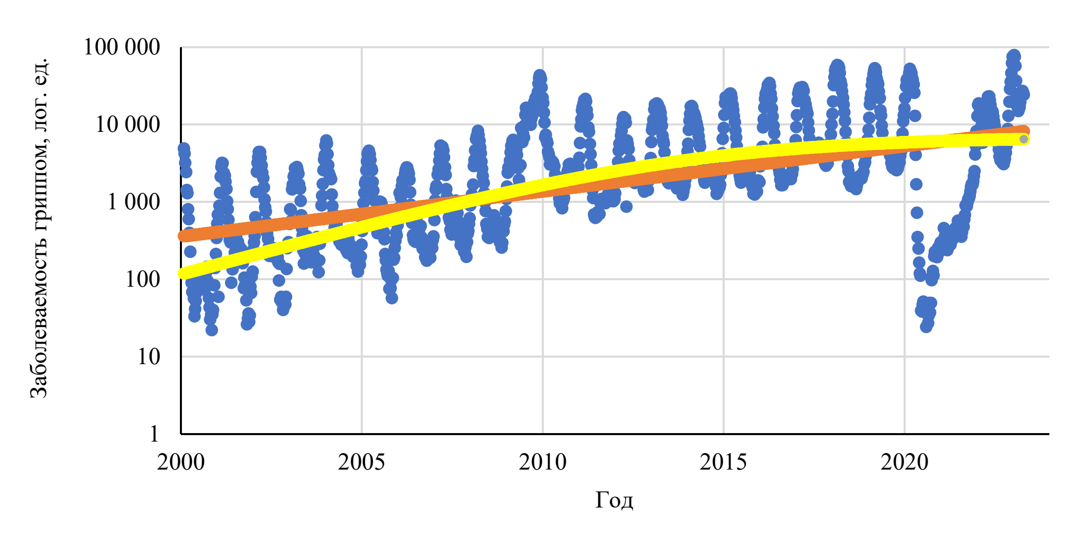


Рис. 9. Инициализация тренда заболеваемости гриппом. Голубым цветом представлена заболеваемость гриппом на логарифмической шкале; оранжевая линия отображает предположенный экспоненциальный тренд; желтая — модель тренда (4)

Знание тренда позволяет исключить его из наблюдаемой статистики и тем самым выделить колебательную составляющую:

$$P(t) = A \cdot sin^6 (Bt + \varphi). \tag{5}$$

Выбранная здесь равной 6 степень синуса отвечает за «размытость» вспышки заболевания во времени. Для нахождения коэффициентов модели следует решить оптимизационную задачу

$$\Sigma_i (F_i - P_i)^2 \to min, \tag{6}$$

где F_i — заболеваемость; P_i — модельное значение; $i \in [1,1212]$.

Результаты соответствующих вычислений показаны на рис. 10 и даются формулой:

$$P(t) = 5{,}03 \cdot sin^6 (3{,}2 \cdot t - 0{,}29). \tag{7}$$

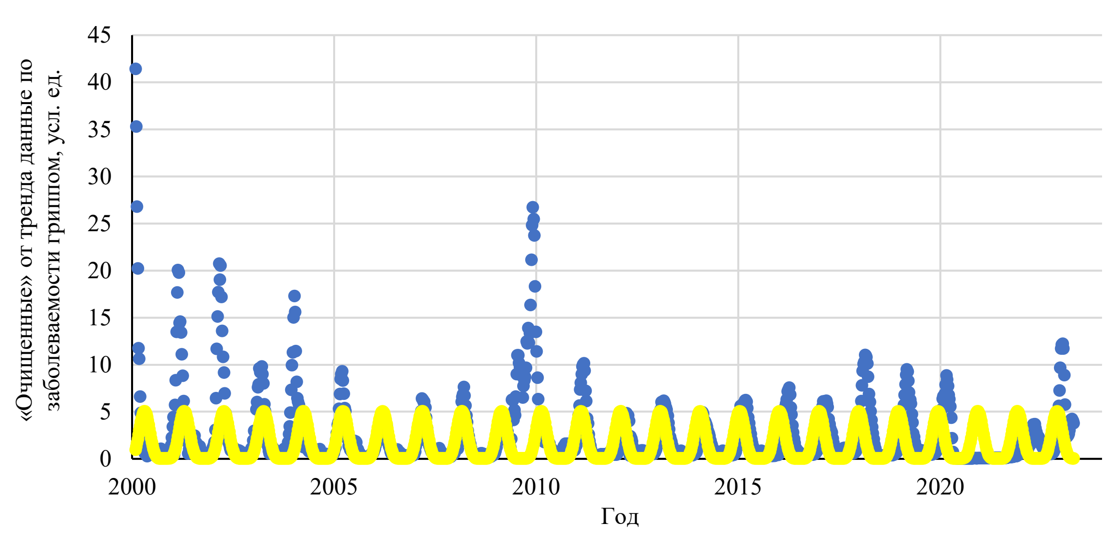


Рис. 10. Результат решения оптимизационной задачи для усовершенствованного тренда. Голубым цветом изображены очищенные от тренда исходные данные; желтым — кривая, соответствующая случайной составляющей

Представленные данные свидетельствуют, что эпидемия гриппа является устоявшимся сезонным процессом, который характеризуется периодом в один год [11, 12]. Из этого следует, что в зависимости от соотношения начальных фаз эпидемий реализуются периоды наложения пиков заболеваемости. Для расчета соответствующих моментов представлена динамика заболеваемости гриппом и COVID-19 в параметрическом виде согласно результатам работы [2]:

$$G(t) = 5{,}03 \cdot sin^6 \left(3{,}15 \cdot \left(2\,022{,}48 + \frac{t}{365} \right) - 0{,}18 \right) \text{ — для гриппа;} \tag{8}$$

$$K(t) = 1 + 0{,}2 \cdot sin \left(0{,}043 \cdot t - \frac{\pi}{2} \right) \text{ — для COVID-19.} \tag{9}$$

В формулах (8, 9) время t отсчитывается с момента t_0 = {03.01.2000 г.} в единицах измерения одни сутки. Стандартное представление этих данных на рис. 11 не информативно, что побуждает преобразовать их в параметрический вид (рис. 12).

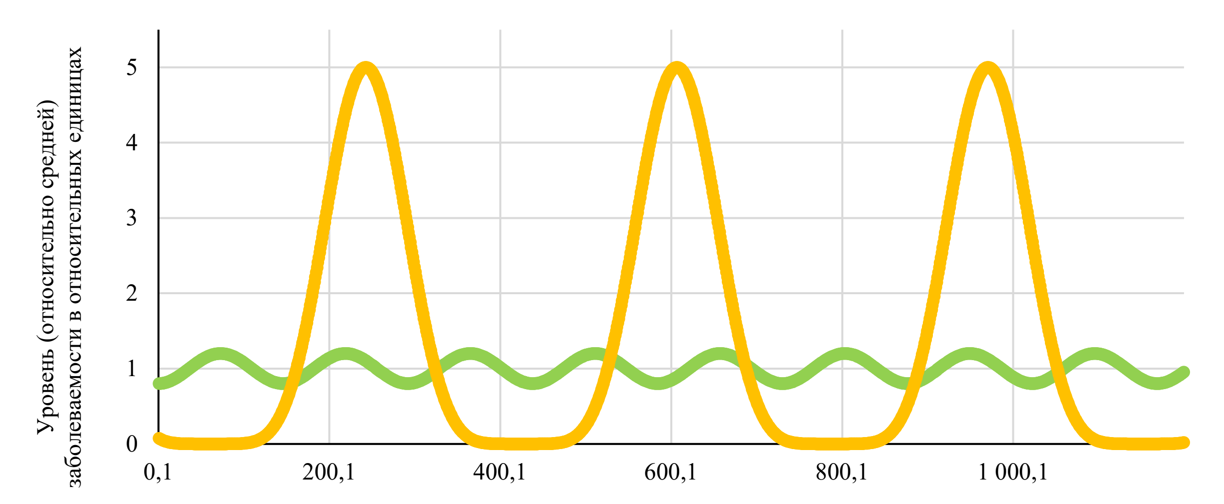


Рис. 11. Сопоставление динамики заболеваемости COVID-19 и гриппа в относительных единицах. Зеленым цветом изображена кривая, соответствующая заболеваемости COVID-19, оранжевым — заболеваемости гриппом

Поскольку все методы математического анализа убедительно доказали, что периодичность вспышек COVID-19 – трижды в год, а гриппа – ежегодно, построим данные рис. 11 в параметрической форме (рис. 12).

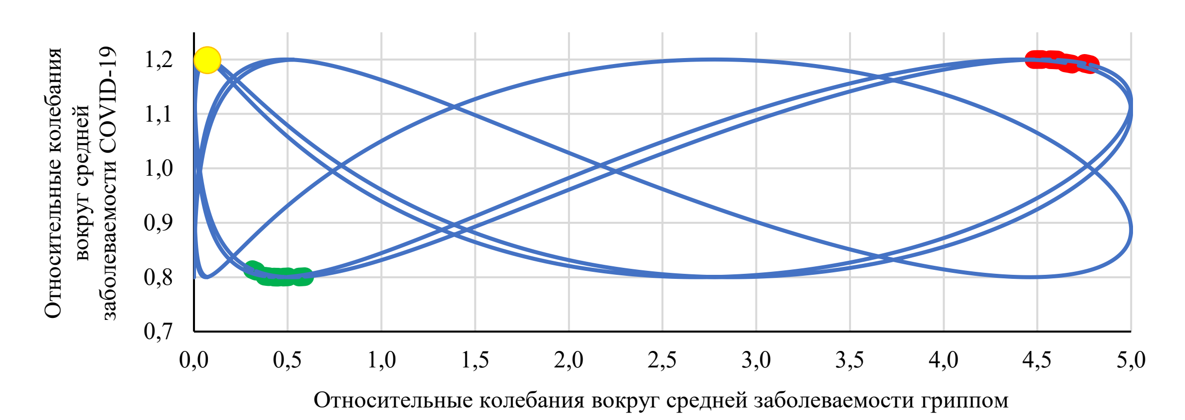


Рис. 12. Сопоставление динамики заболеваемости COVID-19 и гриппом в параметрической форме

Совместное отображение заболеваемости гриппом[2] и COVID-19[3] в форме рис. 12 позволяет выявить наиболее неблагоприятные моменты, когда действия двух вирусов накладываются. В эти периоды следует быть особо осторожным и соблюдать все предписания санэпиднадзора [13–15]. В настоящее время мы находимся в ситуации, отображенной желтой точкой на графике, а от самого неприятного в эпидемическом смысле момента (красная область) нас отделяет 580 дней.

Результаты исследования. В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для согласования имеющейся модели с новыми данными в нее внесены существенные коррективы.
2. Прежние оценки пагубности COVID-19 оказались избыточно пессимистичными.
3. Для повышения информативности анализа и надежности прогнозирования эпидемии привлечены новые методы: Фурье-анализ и техника авторегрессии.
4. Даже совместное использование этих методов позволяет осуществлять лишь краткосрочный прогноз.
5. Сопоставлены особенности течения двух заболеваний сезонного характера (COVID-19 и гриппа).
6. Спрогнозированы моменты, когда совместное действие этих заболеваний на человека окажется особенно пагубным.

[2] Virus Detections by Subtype Reported to FLUNET. Influenza Laboratory Surveillance Information. URL: https://goo.su/z4uULuF (дата обращения: 25.05.2024).
[3] Covid-19 Coronavirus Pandemic. URL: https://www.worldometers.info/coronavirus/ (дата обращения: 25.05.2024).

Обсуждение и заключение. Авторами обоснована необходимость надёжно прогнозировать совпадение пиков заболеваемости гриппом и COVID-19. Показано, что наглядность совпадения достигается путём представления динамики обоих заболеваний в параметрическом виде. Установлено, что вследствие кратности периода обеих эпидемий максимальная и минимальная опасность их наложения также периодична. Числовые показатели цикличности эпидемий были выявлены по экспериментальным данным путём непосредственной аппроксимации, Фурье-разложения и с использованием авторегрессионного алгоритма. Компьютерный эксперимент показал, что даже совместное использование этих методов позволяет осуществлять лишь краткосрочный прогноз эпидемической обстановки. Авторами предсказаны моменты, когда пики заболеваемости гриппом и COVID-19 совпадут.

Список литературы / References

1. Mollarasouli F, Zare-Shehneh N, Ghaedi M. A Review on Corona Virus Disease 2019 (COVID-19): Current Progress, Clinical Features and Bioanalytical Diagnostic Methods. *Microchimica Acta.* 2022;189:103. https://doi.org/10.1007/s00604-022-05167-y

2. Азимова Н.Н., Бедоидзе М.В., Холодова С.Н., Мокина Т.А., Заирова Д.Х., Ермаков А.С. Статистическая оценка биогенного риска для человеческой популяции со стороны новых вирусных инфекций на примере COVID-19. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;1:4–15: https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-4-15

Azimova NN, Bedoidze MV, Kholodova SN, Mokina TA, Zairova DKh, Ermakov AS. Statistical Assessment of Biogenic Risk for the Human Population from New Viral Infections Based on COVID-19. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;(1):4–15. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-4-15

3. Siettos CI, Russo L. Mathematical Modeling of Infectious Disease Dynamics. *Virulence.* 2013;4(4):295–306. https://doi.org/10.4161%2Fviru.24041

4. Steinberg DM, Balicer RD, Benjamini Y, De-Leon H, Gazit D, Rossman H, et al. The Role of Models in the Covid-19 Pandemic. *Israel Journal of Health Policy Research.* 2022;11:36. https://doi.org/10.1186/s13584-022-00546-5

5. Виноградов А.Ю. *Численные методы решения жестких и нежестких краевых задач.* Москва: National Research; 2017. 112 с. URL: https://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Vinogradov2017ru.pdf (дата обращения: 10.03.2024).

Vinogradov AYu. *Numerical Methods for Solving Rigid and Non-Rigid Boundary Value Problems.* Moscow: National Research; 2017. 112 p. URL: https://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Vinogradov2017ru.pdf (accessed: 10.03.2024). (In Russ.)

6. Šušteršic T, Blagojevic A, Cvetkovic D, Cvetkovic A, Lorencin I, Šegota B, et al. Epidemiological Predictive Modeling of COVID-19 Infection: Development, Testing, and Implementation on the Population of the Benelux Union. Frontiers in Public Health. 2021;9:727274. https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.727274

7. Roosa K, Yiseul Lee, Riuyan Luo, Kirpich A, Rothenberg R, Hyman JM, et al. Short-term Forecasts of the COVID-19 Epidemic in Guangdong and Zhejiang, China: February 13–23, 2020. *Journal of Clinical Medicine.* 2020;9(2):596. https://doi.org/10.3390/jcm9020596

8. Макаровских Т.А., Аботалеб М.С.А. Автоматический подбор параметров модели ARIMA для прогноза количества случаев заражения и смерти от Covid-19. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика.* 2021;10(2):20–37. https://doi.org/10.14529/cmse210202

Makarovskikh TA, Abotaleb MSA. Automatic Selection of ARIMA Model Parameters to Forecast COVID-19 Infection and Death Cases. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering.* 2021;10(2):20–37. https://doi.org/10.14529/cmse210202 (In Russ.)

9. Ioannidis JPA, Cripps S, Tanner MA. Forecasting for COVID-19 Has Failed, *International Journal of Forecasting.* 2022;38(2):423–438. https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2020.08.004

10. Sonal Jain, Ho-Hon Leung, Firuz Kamalov. A Computational Numerical Performance for Solving the Mathematical Epidemiological Model Based on Influenza Disease, *Scientific African*. 2022;17:e01383. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01383

11. Bucyibaruta G, Dean CB, Mahmoud Torabi. A Discrete-Time Susceptible-Infectious-Recovered-Susceptible Model for the Analysis of Influenza Data. *Infectious Disease Modelling.* 2023;8(2):471–483. https://doi.org/10.1016/j.idm.2023.04.008

12. Xinzhu Guan, Fan Yang, Yongli Cai, Weiming Wang. Global Stability of an Influenza A Model with Vaccination. *Applied Mathematics Letters.* 2022;134:108322. https://doi.org/10.1016/j.aml.2022.108322

13. Fong Min W, Gao Huizhi, Wong Jessica Y, Xiao Jingyi, Shiu Eunice YC, Ryu Sukhyun, et al. Nonpharmaceutical Measures for Pandemic Influenza in Non healthcare Settings-Social Distancing Measures. *Emerging Infectious Diseases.* 2020;26(5):976–984. https://doi.org/10.3201/eid2605.190995

14. Lazarus JV, Wyka K, White TM, Picchio CA, Gostin LO, Larson HJ, et al. A Survey of COVID-19 Vaccine Acceptance across 23 Countries in 2022. *Nature Medicine* 2023;29:366–375. https://doi.org/10.1038/s41591-022-02185-4

15. Lin J, Li C, He W, Trends in Influenza Vaccine Uptake before and during the COVID-19 Pandemic in the USA. *Public Health.* 2023;225:291–298. https://doi.org/10.1016/j.puhe.2023.10.028

Об авторах:

Наталья Николаевна Азимова, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, arkomaazimov@mail.ru

Джахангул Хайруллаевна Заирова, магистрант кафедры медиатехнологий Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 8187-5637, ORCID, gulyazair@gmail.com

Александр Сергеевич Ермаков, магистрант кафедры автоматизации производственных процессов Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 4966-2084, ORCID, ermakov_sahsa11@mail.ru

Евгений Николаевич Ладоша, кандидат технических наук, доцент кафедры медиатехнологий Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1).

Заявленный вклад авторов:

Н.Н. Азимова: разработка и реализация динамической модели эпидемии, разработка методов статистического анализа.

Д.Х. Заирова: подбор и верификация новых статистических данных, сопоставление результатов экспериментов по прогнозированию динамики эпидемии с реальными данными.

А.С. Ермаков: сравнительная характеристика эпидемий COVID-19 и гриппа, выполнение экспериментов по прогнозированию динамики эпидемии, подготовка текста статьи.

Е.Н. Ладоша: формулировка содержательных выводов и рекомендаций, доработка текста.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Natalya N. Azimova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Applied Mathematics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), ORCID, arkomaazimov@mail.ru

Dzhakhangul Kh. Zairova, Master's Degree Student of the Media Technologies Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code: 8187-5637, ORCID, gulyazair@gmail.com

Aleksandr S. Ermakov, Master's Degree Student of the Automation of Production Processes Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code: 4966-2084, ORCID, ermakov_sahsa11@mail.ru

Evgenii N. Ladosha, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Media Technologies Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation).

Claimed Contributorship:

NN Azimova: development and implementation of a dynamic epidemic model, development of statistical analysis methods.

DKh Zairova: selection and verification of new statistical data, comparison of the results of experiments on forecasting the epidemic dynamics with the real data.

AS Ermakov: comparative characteristics of the COVID-19 and influenza epidemics, performing experiments to predict the dynamics of the epidemic, preparing the text of the article.

EN Ladosha: formulation of meaningful conclusions and recommendations, revision of the text.

Conflict of Interest Statement: **the authors do not have any conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 31.05.2024
Поступила после рецензирования / Revised 21.06.2024
Принята к публикации / Accepted 27.06.2024

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ
CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



УДК 621.762. 1
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-67-77

Оригинальное эмпирическое исследование

EDN: QZFWTB

Фазовые превращения в порошковых спеченных сталях при охлаждении

М.С. Егоров[1] ✉, **Р.В. Егорова**[1], **В.Ю. Лопатин**[2]
[1]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2]Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, г. Москва, Российская Федерация
✉ aquavdonsk@mail.ru

Аннотация

Введение. Термическая обработка является наиболее распространенной последеформационной операцией, применяемой к порошковым сталям (ПС). Принципиальные положения теории этого процесса, разработанные для компактных материалов, справедливы и для рассматриваемых ПС. Однако специфика структуры последних вносит количественные и качественные изменения в кинетику процессов, происходящих при различных видах термической обработки. Поэтому при разработке новых материалов необходимо уделять большое внимание влиянию термической обработки на их структуру и свойства. В связи с этим целью данного исследования является анализ фазовых превращений в порошковых спеченных сталях при охлаждении и определение их механических свойств.

Материалы и методы. В работе использованы отечественные порошки марок ПЖРВ 2.200.28 (ТУ 14-1-5365-98) и ПЛ-Н4Д2М (ТУ 14-5402-2002) производства ПАО «Северсталь» (г. Череповец). При смешивании в шихту добавлялись ультрадисперсные добавки нитрида кремния (Si_3N_4) и оксида никеля (NiO) производства компании «Плазнотерм» (г. Москва). Перед использованием порошки проходили контроль на универсальном лазерном приборе измерения размера частиц (модель FRITSCH ANALYSETTE 22 MicroTec plus) и анализаторе субмикронных частиц (Beckman COULTER № 5). Для приготовления шихты использовались двухконусный смеситель марки RT-NM05S (Тайвань) и ультразвуковая станция для просеивания и смешивания порошка с ультрадисперсными частицами Assonic SPC (Китай). Статическое холодное прессование проводилось в лабораторных пресс-формах на гидравлическом прессе модели TS0500-6 (Китай) с максимальным усилием в 50 тонн. Гомогенизирующее спекание проведено в лаборатории термической обработки кафедры «Материаловедение и технологии металлов» ДГТУ в муфельной электропечи модели SNOL 6,7/1300 в диапазоне температур 900–1150 °С в среде защитного газа — диссоциированного аммиака. Время спекания — 15–180 минут. В таких же печах производилась и термическая обработка спеченных порошковых сталей. Закалка осуществлялась на спеченных образцах при температуре 800 °С. Исходная пористость спеченных образцов составляла 10,15,25 %. Отпуск спеченных образцов проходил при температуре 100–300 °С. Испытания на растяжение проводились в соответствии с ГОСТ 18227–85[1] с использованием сервогидравлической напольной разрывной машины МГС-В 15 в автоматическом режиме с помощью персонального компьютера. Для измерения твердости использовался твердомер Роквелла ТК-2М с индентированным алмазным конусом при общей нагрузке 1471 Н.

[1] ГОСТ 18227–85 (ИСО 2740-86). *Материалы порошковые. Метод испытания на растяжение.* URL: https://docs.cntd.ru/document/1200010599 (дата обращения: 12.04.2024).

Результаты исследования. В работе выполнены исследования, которые позволили определить закономерности фазовых превращений в порошковых спеченных сталях с ультрадисперсными частицами при охлаждении после операции закалки. Экспериментально определены значения критических точек охлаждения для спеченных порошковых сталей эвтектоидного состава для скоростей охлаждения 60–400 °С/мин. Определены также механические свойства спеченных порошковых сталей с ультрадисперсными частицами в зависимости от температурного интервала превращений.
Обсуждение и заключение. Исследования позволили установить влияние ультрадисперсных частиц на температуру критических точек спеченных ПС эвтектоидного состава, построить диаграммы изотермического превращения аустенита, а также определить механические свойства спеченных порошковых сталей с ультрадисперсными частицами. Анализ полученных результатов исследований показал разнонаправленное влияние частиц оксида никеля и нитрида кремния на фазовые превращения в порошковых спеченных сталях.

Ключевые слова: спеченные порошковые стали, ультрадисперсные частицы, критические точки охлаждения, изотермическое превращение, механические свойства

Благодарности. За помощь в получении и обсуждении результатов исследования авторы выражают искреннюю признательность сотрудникам кафедры ПМиФП НИТУ МИСиС и лично доценту, кандидату технических наук В.Ю. Лопатину, сотрудникам кафедры «Материаловедение и технологии металлов» ДГТУ доктору технических наук, профессору В.Н. Пустовойту, доктору технических наук, профессору Ю.М. Домбровскому.

Для цитирования. Егоров М.С., Егорова Р.В., Лопатин В.Ю. Фазовые превращения в порошковых спеченных сталях при охлаждении. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(3):67–77. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-67-77

Original Empirical Research

Phase Transformations in Powder Sintered Steels during Cooling

Maxim S. Egorov [1] ✉, **Rimma V. Egorova**[1], **Vladimir Yu. Lopatin**[2]
[1]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2]National Research Technical University MISIS, Russian Federation, Moscow, Russian Federation
✉ aquavdonsk@mail.ru

Abstract
Introduction. Heat treatment is a common post-processing operation applied to powder steel (PS) after deformation. The fundamental principles of heat treatment theory, developed for solid materials, also apply to PS. However, the specific structure of PS introduces quantitative and qualitative differences in the kinetics of heat treatment processes. Therefore, it is important to understand the effect of heat treatment on the structure and properties of PS when developing new materials. The aim of this study is to investigate phase transformations in sintered powder steels during cooling and to determine their mechanical properties after heat treatment.
Materials and Methods. The study used domestic powders of brands PZHRV 2.200.28 (TU 14-1-5365-98) and PL-N4D2M (TU 14-5402-2002) produced by PJSC Severstal (Cherepovets). During the mixing process, ultrafine additives of silicon nitride (Si3N4) and nickel oxide (NiO) manufactured by Plasnotherm (Moscow) were added to the charge. Before use, the powders were tested on a universal laser particle size measuring device (FRITSCH ANALYSETTE 22 MicroTec plus) and a submicron particle analyzer (Beckman COULTER No. 5). To prepare the charge, we used a two-cone mixer RT-NM05S (Taiwan) and an ultrasonic station for sieving and mixing powders with ultrafine particles Assonic SPC (China). Static cold pressing was carried out in laboratory molds on a hydraulic press model TS0500-6 (China) with a maximum force of 50 tons. Homogenizing sintering was performed in the laboratory of heat treatment at the Department of Materials Science and Technology of Metals at Don State Technical University in a muffle electric furnace model 6.7/1300 in the temperature range of 900–1150°C, in a protective gas environment — dissociated ammonia. Sintering time was 15–180 minutes. Heat treatment of sintered powder steels was also performed in these furnaces. Quenching of sintered samples was carried out at a temperature of 800°C. The initial porosity of sintered samples was 10.15.25%. Sintered samples were cooled at a temperature between 100 and 300°C. Tensile testing was conducted in accordance with GOST 18227–85, using a floor-mounted servohydraulic tensile testing machine MGS-V15 in an automatic mode, with the help of a personal computer. Hardness was measured using a Rockwell hardness tester TK-2M with a diamond cone indenter under a total load of 1471 N.

Results. The study conducted allowed us to identify the patterns of phase transformation in powder-sintered steels with ultra-fine particles during cooling after quenching. We experimentally determined the values of critical cooling points for powder-sintered eutectic steels at cooling rates of 60–400°C per minute. Additionally, we determined the mechanical properties of sintered powder steels with ultrafine particles depending on the temperature range of transformations

Discussion and Conclusion. The research has allowed us to establish the effect of ultrafine particles on the temperature of the critical points of sintered eutectoid PS, to construct diagrams of isothermal transformation of austenite, as well as to determine the mechanical properties of powder-sintered steels containing ultrafine particles. The analysis of the results obtained from the research has shown a multifaceted impact of nickel oxide and silicon nitride particles on phase transformations in powder-sintered steel.

Keywords: sintered powder steels, ultrafine particles, critical cooling points, isothermal transformation, mechanical properties

Acknowledgements. The authors would like to express their sincere gratitude to the staff of the Department of Powder Metallurgy and Functional Coatings at National Research Technological University MISIS, and particularly to Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering) V.Yu. Lopatin. They also extend their thanks to the staff of the Materials Science and Technology of Metals Department at Don State Technical University, including Dr. Sci. (Engineering), Professor V.N. Pustovoit and Dr. Sci. (Engineering), Professor Yu.M. Dombrovskii. Their assistance in obtaining and discussing the study's results is greatly appreciated.

For citation. Egorov MS, Egorova RV, Lopatin VYu. Phase Transformations in Powder Sintered Steels during Cooling. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(3):67–77. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-67-77

Введение. Под термической обработкой понимается совокупность операций нагрева, выдержки при высоких температурах и охлаждения в целях изменения структуры и обрабатываемости материала, улучшения сочетания его механических и физических свойств без изменения формы и размеров изделия. Термическая обработка является эффективным методом повышения физико-механических свойств и износостойкости стали [1].

Специфические особенности спеченных сталей (пористость, неоднородность структуры, высокая окисляемость и др.) затрудняют использование технологических режимов термической обработки, разработанных для литых сталей, хотя основные закономерности процессов, происходящих при нагреве и охлаждении компактной стали, могут быть перенесены и на спеченные материалы [2].

Исследования порошковых материалов, в том числе и термической обработки, показывают существенное влияние пористости, как одной из особенностей их структуры, на развитие фазовых превращений и при нагреве, и при охлаждении [3]. Присутствие пор в порошковых материалах и порошковых сталях, а также большое содержание неметаллических включений, в том числе тех, которые модифицируют структуру и плотность дислокаций, облегчают процесс формирования зародышей новых фаз. Это утверждение подкреплено результатами термодинамического анализа фазовых превращений, проведенного на основе соответствующих данных [4].

Цель данной работы — выявить особенности кинетики фазовых превращений в порошковых спеченных сталях с ультрадисперсными частицами при охлаждении, определить их механические свойства в зависимости от температурного интервала. Основная задача исследования в связи с этим —проанализировать влияние пористости и скорости охлаждения на изменение положения критических точек Ar_1 и Ar_3, а также воздействие ультрадисперсных добавок на начальную фазу распада аустенита и механические свойства спеченных порошковых сталей.

Материалы и методы. В работе использованы порошки марок ПЖРВ 2.200.28[2] и Н4Д2М[3] производства ПАО «Северсталь» (г. Череповец) и ультрадисперсные частицы оксида никеля и нитрида кремния компании «Плазмотерм»[4]. Данные об общем химическом составе представлены в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав порошка

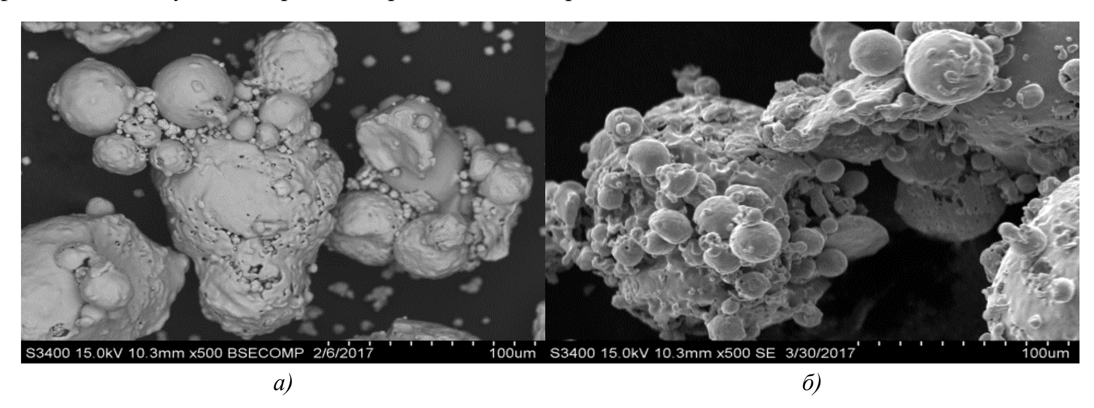
Марка порошка	Массовое содержание компонентов, %									
	Mo	Ni	C	O	H	Cu	Si	Mn	0P	S
ПЖРВ 2.200.26	–	–	0,090	0,140	–	–	0,014	0,087	0,012	0,005
Н4Д2М	0,400–0,500	3,600–4,400	0,020	0,025	–	1,300–1,700	0,050	0,150	0,020	0,020

[2] ТУ 14-5365-98. *Порошок железный, распылённый воздухом.*
[3] ТУ 14-5402-2002. *Порошок железный диффузионно-легированный.*
[4] *Компания ООО «Плазмотерм». Нанопорошки металлов.* URL: https://plasmotherm.ru/catalog/metal/item_4.html (дата обращения: 12.04.2024).

Технологические свойства порошка ПЖРВ 2.200.26: насыпная плотность от 2,4 до 3,0 г/см^3, текучесть не более 37 сек/50 г, плотность при Р = 700 МПа составляет 7,0–7,05 г/см^3, прочность при плотности 6,5 г/см^3 более 14 Н/мм^2. Аналогом являются порошки шведской фирмы Höganäs: AHC 100.29, NC 100.24, SC100.26, ASC100.29. Область применения: детали амортизационной группы, детали трансмиссии, корпусные детали, шестерни, шатуны, муфты, втулки и др.

Согласно ТУ 14-5402-2002 порошок марки ПЛ-Н4Д2М производства компании «Северсталь» содержит 4 % никеля, 1,5 % меди и 0,5 % молибдена, разработан специалистами ЦНИИчермет им. Байкова. В его основе железный порошок линейки ПЖРВ. Конечный продукт представляет собой частично легированную смесь с отличной уплотняемостью (при давлении прессования 600 МПа значения плотности составляют не менее 7,1 г/см^3).

Морфология исследуемых порошков представлена на рис. 1.



а) *б)*

Рис. 1. Частицы порошка: *а* — ПЛ-Н4Д2М; *б* — ПЖРВ 2.200.26

На рис. 2 представлено РЭМ-изображение ультрадисперсных частиц оксида никеля. В таблице 2 приведены свойства частиц оксида никеля. Порошок имеет широкое распределение частиц по размерам и представляет собой индивидуальные частицы сферической формы[5].

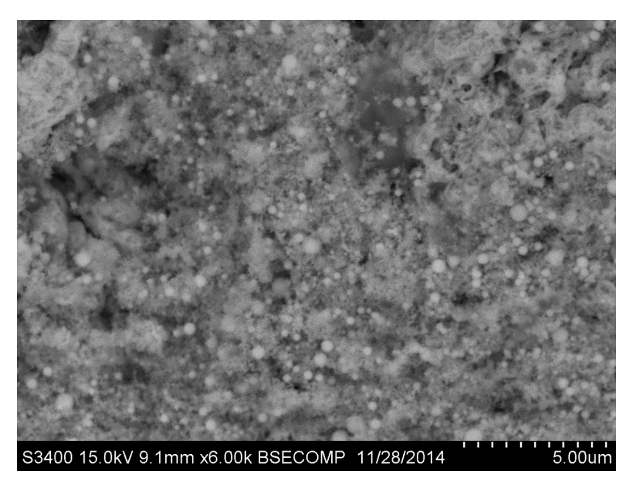


Рис. 2. Снимки с РЭМ ультрадисперсных частиц NiO

Таблица 2

Основные свойства и характеристики ультрадисперсного порошка оксида никеля

Технология получения	Плазмохимический синтез
Цвет порошка	черный
Размер частиц, нм	50–85
Средний размер агломератов, мкм	30–80
Удельная поверхность, м^2/г	5–20
Содержание основного компонента, %	99,8

[5] ТУ 14-5402-2002 *Порошок железный диффузионно-легированный.*

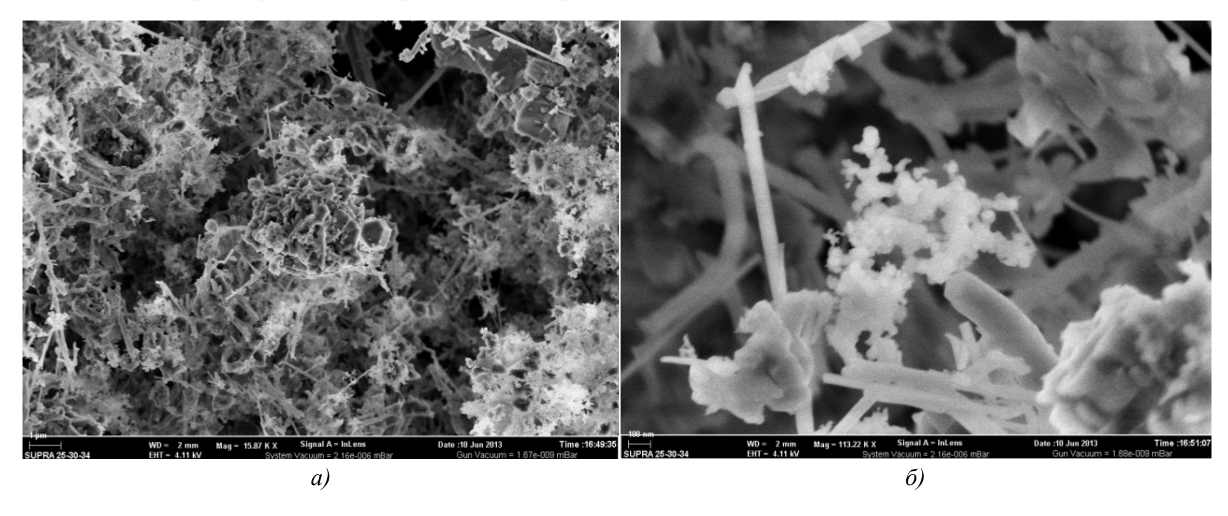
В таблице 3 представлены характеристики ультрадисперсного порошка нитрида[6].

Таблица 3

Характеристики ультрадисперсного порошка нитрида кремния

Параметр	Значение
Размер частиц, нм	10–30
Удельная геометрическая поверхность, м^2/г	50–140
Содержание основного компонента, %	99,75

Ультрадисперсные частицы имеют форму игл (рис. 3), образуют ворсистые хлопья после контактирования с водой и не меняют размер после ультразвуковой обработки[7].



а) *б)*

Рис. 3. Снимок через растровый электронный микроскоп ультрадисперсных частиц Si3N4:
а — общий вид частицы; *б* — частицы при увеличении 109

Проведение экспериментов. Операция прессования проводилась с использованием лабораторных пресс-форм и гидравлического пресса модели TS0500-6 (Китай) с максимальным усилием 30 тонн. Призматические заготовки формовались в пресс-форме, представленной на рис. 4. Данная пресс-форма состоит из обоймы (1), двух полуматриц (2), пуансона (3), вставки (4), которые изготовлены из инструментальных сталей У8, У10А, их твердость после проведения термической обработки достигала 55–62 HRC. Остаточная пористость образцов после прессования в зависимости от приложенного давления была 10–40 %. Заготовки призматической формы после формования имели размеры 9,5х54,3 мм.

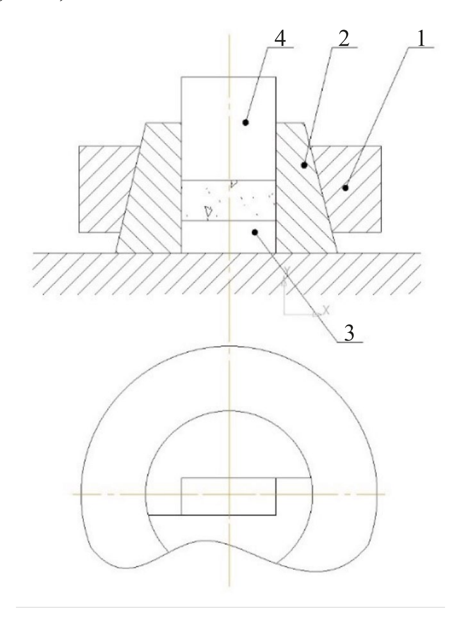


Рис. 4. Схема пресс-формы для холодного прессования призматических образцов

[6] ТУ 14-5402-2002 *Порошок железный диффузионно-легированный.*
[7] Там же

На рис. 5 представлена пресс-форма для изготовления образцов для испытаний на предел прочности при растяжении.



Рис. 5. Лабораторная пресс-форма для изготовления образцов для испытания на растяжение по ГОСТ 8227-98 для холоднопрессованных и спеченных образцов

Спекание и термическая обработка проводились в лаборатории термической обработки кафедры «Материаловедение и технологии металлов» ДГТУ в камерной электропечи с защитной атмосферой ПКЗ-1,0-7 (Россия) в диапазоне температур 900–1150 °С в среде защитного газа — диссоциированного аммиака (рис. 6). Время спекания — 15–180 минут.

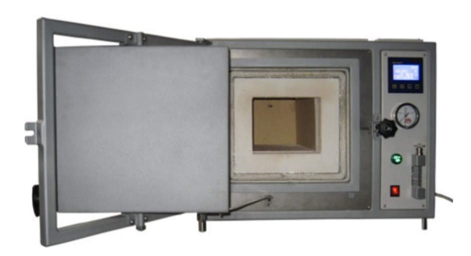
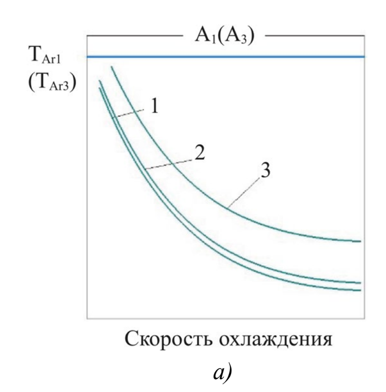


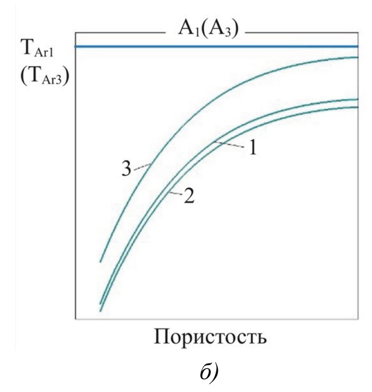
Рис. 6. Лабораторная камерная электропечь с защитной атмосферой ПКЗ-1,0-7

Результаты исследования. Представим процесс фазовых превращений порошковых спеченных сталей в зависимости от их структурного состояния. Была установлена зависимость расположения точек A_{r1} и A_{r3} от таких параметров, как скорость охлаждения ($V_{охл}$), пористость образцов и введение в состав стали ультрадисперсных частиц (рис. 7). Эти параметры по-разному влияют на температурные интервалы фазовых превращений и кинетику превращения аустенита [5]. Более высокая скорость охлаждения замедляет, а большая пористость ускоряет превращение аустенита, сдвигая температурные интервалы в противоположных направлениях.

Влияние добавок оксида никеля и нитрида кремния разнонаправлено [6]. Если первая добавка понижает температуру критических точек, то вторая — её повышает. Значения критических точек для спеченных ПС эвтектоидного состава для скоростей охлаждения 60–400 °С/мин приведены в таблице 4. У ПС на основе порошка Н4Д2М температура критических точек ниже, по сравнению с железным порошком, что обусловлено замедлением диффузионных процессов в легированной матрице [7].



а)



б)

Рис. 7. Зависимость положения точек Ar1 и Ar3 для порошковых сталей:
1 — без добавок; 2 — ПС + 1 % NiO; 3 — ПС + 0,2 % Si3N4; *а* — от скорости охлаждения; *б* — от пористости

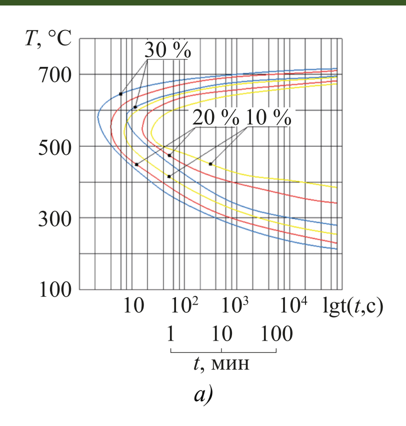
Таблица 4

Температурные точки Ar_1 и Ar_3 порошковых сталей

Основа сплава	Содержание углерода	Пористость, %	Температура точки A_{r1}, C	Температура точки A_{r3}
ПЖРВ 2.200.26	0,5	10	695*; 693**; 690***	725; 722; 719
		20	705; 702; 698	730; 727; 720
		30	712; 710; 708	737; 735; 732
	0,8	10	715; 713; 710	–
		20	718; 713; 708	–
		30	720; 716; 712	–
ПЖРВ 2.200.26 + 1 % NiO	0,5	10	693; 690; 688	723; 720; 717
		20	703; 700; 696	728; 725; 718
		30	710; 708; 705	735; 732; 728
	0,8	10	712; 710; 708	–
		20	716; 711; 705	–
		30	723; 720; 716	–
ПЖРВ 2.200.26 + 0,2 % Si_3N_4	0,5	10	700; 695; 693	730; 726; 722
		20	710; 707; 702	736; 732; 726
		30	718; 715; 712	740; 737; 735
	0,8	10	720; 722; 724	–
		20	723; 720; 717	–
		30	725; 722; 718	–
Н4Д2М	0,5	10	692; 690; 687	723; 719; 715
		20	700; 698; 695	726; 723; 716
		30	708; 705; 702	734; 730; 728
	0,8	10	710; 708; 702	–
		20	714; 711; 706	–
		30	717; 712; 708	–
Н4Д2М +1 % NiO	0,5	10	690; 686; 682	720; 717; 713
		20	700; 696; 692	725; 722; 716
		30	705; 703; 697	730; 728; 722
	0,8	10	707; 704; 698	–
		20	711; 708; 706	–
		30	715; 710; 706	–
Н4Д2М + 0,2 % Si_3N_4	0,5	10	696; 692; 688	724; 720; 718
		20	706; 702; 698	732; 728; 722
		30	714; 710; 706	736; 730; 725
	0,8	10	716; 714; 710	–
		20	718; 720; 722	–
		30	720; 722; 726	–
*Примечание: скорости охлаждения, °/мин: *–60; **–200; ***–400*				

При медленном охлаждении аустенит распадается на эвтектоидную феррито-цементитную смесь, дисперсность которой зависит от степени переохлаждения [8]. Переохлажденный аустенит сохраняется в течение инкубационного периода, по истечении которого начинается его распад. Для описания распада аустенита используют С-образные кривые (рис. 8) [9].

Анализ диаграмм изотермического превращения аустенита порошковых сталей ПЖРВ 2.200.26 + 0,8 % С и Н4Д2М + 0,8 % С показывает, что с увеличением пористости устойчивость переохлажденного аустенита уменьшается, о чем свидетельствует смещение С-образных кривых влево, область минимальной устойчивости аустенита переходит в сторону повышенных температур. Общее время изотермического распада аустенита возрастает.



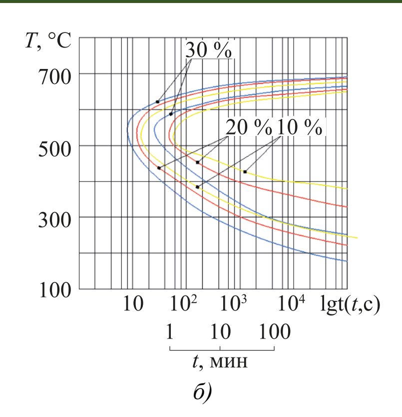


Рис. 8. Диаграмма изотермического превращения аустенита образцов с пористостью 10, 20, 30 %:
а — из стали ПЖРВ 2.200.26 + 0,8 % С; *б* — из стали Н4Д2М + 0,8 %

При использовании легированного порошка С образные кривые смещаются влево и в область более низких температур, что подтверждает теоретическое положении о диффузионном характере образования феррито-цементитной смеси при распаде аустенита. Каким образом ультрадисперсные добавки (0,2 % Si_3N_4 и 1 % NiO) влияют на распад аустенита? Чтобы это определить, были проведены эксперименты в области минимальной устойчивости аустенита. Результаты показаны на рис. 9. Сплошная линия — сталь на основе порошка ПЖРВ 2.200.26, штриховая линия — сталь на основе порошка Н4Д2М.

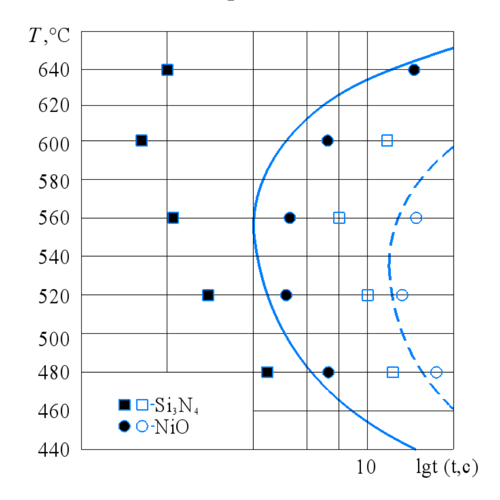


Рис. 9. Влияние ультрадисперсных добавок в сталь на основе порошка ПЖРВ 2.200.26 (заштрихованные маркеры)
и на основе порошка Н4Д2М (незаштрихованные маркеры) на начальную фазу распада аустенита

Добавление нитрида кремния способствует распаду аустенита, повышая температуру минимальной устойчивости аустенита, и сокращению инкубационного периода [9]. Это объясняется созданием включениями добавки областей облегченного появления зародышей феррита и карбида железа. Добавление оксида никеля приводит к повышению содержания никеля в твердом растворе, что замедляет диффузионные процессы и распад аустенита.

В работе [10] показано, что в интервале температур 700–600 °С аустенит распадается на пластинчатый перлит, при температуре минимальной устойчивости продуктом распада аустенита является троостит, а в области температур от 500 до 250 °С превращение аустенита происходит с образованием бейнита.

У доэвтектоидных сталей распаду аустенита предшествует выделение феррита. При этом поверхность пор является областью преимущественного выделения и роста ферритных включений, по сравнению с высокоугловыми границами [11]. Такой механизм зарождения зерен феррита обусловливает отсутствие видманштеттовой структуры, снижающей механические свойства. Выделение избыточной ферритной составляющей происходит стадийно. Сначала образуется микрообъем с кристаллической структурой, близкой к равновесной структуре феррита. Затем этот микрообъем трансформируется в устойчивый центр новой фазы путем диффузионного изменения химического состава [12].

Особенность порошковой структуры стали, а именно наличие свободных поверхностей пор с повышенной диффузионной подвижностью атомов, приводит к преимущественному зарождению ферритной фазы именно на этих поверхностях, что отражается в смещении С-кривых превращения аустенита на диаграммах. В таблице 5 приведены механические свойства спечённых ПС (пористость 10 %) в зависимости от температурного интервала превращения [13].

Таблица 5

Механические свойства спеченных порошковых сталей

Состав стали	Температурный интервал, ° С	Механические свойства		
		$\sigma_в$, МПа	HRB	δ, %
ПЖРВ 2.200.26 + 0,8 % С	700–680	220	70	11
	650–630	260	82	13
	600–550	280	88	13
ПЖРВ 2.200.26 + 0,8 % С + 1 % NiO	700–680	222	71	11
	650–630	262	83	12
	600–550	281	89	12
ПЖРВ 2.200.26 + 0,8 % С + 0,2 % Si_3N_4	700–680	270	85	10
	650–630	290	90	10
	600–550	310	95	9
Н4Д2М + 0,8 % С	680–660	780	80	8
	630–600	795	83	9
	570–540	800	87	10
Н4Д2М + 0,8 % С + 1 % NiO	680–660	850	92	11
	630–600	860	103	11
	570–540	880	106	12
Н4Д3М + 0,8 % С + 0,2 % Si_3N_4	680–660	810	102	7
	630–600	860	105	8
	570–540	880	108	8

Обсуждение и заключение. В результате выполненных исследований установлено, что повышение скорости охлаждения снижает температурный интервал распада аустенита. При этом возрастает дискретность феррито-цементитной смеси, обусловливающая повышение предела прочности и твердости [14]. Введение оксида никеля в шихту на основе порошка ПЖРВ 2.200.26 практически не влияет на механические свойства стали. Благоприятное влияние этой добавки проявилось на стадии спекания, в ходе которого произошло восстановление оксида и растворение никеля в железной матрице. Охлаждение после спекания привело к образованию перлитной структуры без металлографически выявляемых дисперсно-упрочняющих включений. Поэтому при последующей термической обработке, основанной на аустенито-перлитном превращении, отсутствует эффект упрочения от дополнительных включений. При использовании порошка Н4Д2М влияние вводимой в шихту добавки оксида никеля более заметно. Это обстоятельство объясняется концентрацией никеля в ферритной составляющей до 5 % и повышением эффективности упрочнения феррита с ростом содержания никеля в твердом растворе [15]. В отличие от оксида никеля, введенные в шихту частицы нитрида кремния сохраняются в структуре стали в виде включений упрочняющей фазы. Данный характер структуры способствует появлению зародышей новых фаз при распаде аустенита и повышает предел прочности и твердость за счет эффекта дисперсионного упрочнения [16]. Проведен анализ диаграмм изотермического превращения аустенита порошковых сталей ПЖРВ 2.200.26 + 0,8 % С и Н4Д2М + 0,8 % с пористостью 10, 20, 30 %. При использовании легированного порошка С-образные кривые смещаются влево и в область более низких температур, что подтверждает теоретическое положение о диффузионном характере образования феррито-цементитной смеси при распаде аустенита. Определены зависимости механических свойств спеченных порошковых сталей с ультрадисперсными частицами от температурного интервала превращений.

Список литературы / References

1. Петросян А.С., Галстян Л.З. Особенности термической обработки порошковых сталей марки П40ХН с повышенными свойствами. *Вестник Национального политехнического университета Армении. Металлургия, материаловедение, недропользование.* 2017;(2):40–48.

Petrosyan HS, Galstyan LZ. Peculiarities of Heat Treatment of the П40ХН - Gradepowder Steels with Improved Properties. *Proceedings of NPUA. Metallurgy, Material Science, Mining Engineering.* 2017;(2):40–48. (In Russ.)

2. Дорофеев Ю.Г. Становление, формирование и перспективы развития Новочеркасской научной школы в области изучения функциональных порошковых материалов. *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2008;(1):50–55.

Dorofeev YuG. Establishment, Formation, and Prospects for the Development of Novocherkassk Scientific School in the Field of Studying Functional Powdered Materials. *Powder Metallurgy and Functional Coatings.* 2008;(1):50–55. (In Russ.)

3. Шоршоров М.Х., Гвоздев А.Е., Золотухин В.И., Сергеев А.Н., Калинин А.А., Бреки А.Д. и др. *Разработка прогрессивных технологий получения и обработки металлов, сплавов, порошковых и композиционных наноматериалов.* Монография. Тула: Изд-во ТулГУ; 2016. 235 с.

Shorshorov MKh, Gvozdev AE, Zolotukhin VI, Sergeev AN, Kalinin AA, Breki AD, et al. *Development of Advanced Technologies for the Production and Processing of Metals, Alloys, Powder and Composite Nanomaterials.* Monograph. Tula: TulSU Publishing House; 2016. 235 p. (In Russ.)

4. Домбровский Ю.М., Степанов М.С. Новые возможности поверхностного легирования стали в порошковых средах. *Вестник машиностроения.* 2015;(8):79–81.

Dombrovskyi YuM, Stepanov MS. New Facilities of Surface Alloyage of Steels in Powder Environments. *Vestnik mashinostroeniya.* 2015;(8):79–81. (In Russ.)

5. Крохалев А.В., Харламов В.О., Тупицин М.А., Кузьмин С.В., Лысак В.И. О возможности получения твердых сплавов из смесей порошков карбидов с металлами взрывным прессованием без спекания. *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2017;(2):22–30. https://doi.org/10.17073/1997-308X-2017-2-22-30

Krokhalev AV, Kharlamov VO, Tupitsin MA, Kuzmin SV, Lysak VI. On the Possibility of Obtaining Hard Alloys from Mixtures of Carbide Powders and Metals by Explosive Compacting without Sintering. *Powder Metallurgy and Functional Coatings.* 2017;(2):22–30. https://doi.org/10.17073/1997-308X-2017-2-22-30 (In Russ.)

6. Шишка В.Г. Скориков А.В., Иванова И.В., Шишка Н.В. Выбор легирующих элементов для улучшения обрабатываемости резанием порошковых конструкционных сталей. *Инженерный вестник Дона.* 2018;4(51):11. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5307 (дата обращения: 20.06.2024).

Shishka VG, Skorikov AV, Ivanova IV, Shishka NV. Selection of Alloying Elements to Improve the Machinability of Powder Structural Steels. *Engineering journal of Don.* 2018;4(51):11. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5307 (accessed: 20.06.2024). (In Russ.)

7. Дьячкова Л.Н., Дечко М.М. Влияние дисперсных микродобавок на структуру и свойства порошковых углеродистой и высокохромистой сталей. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2015;(2):8–14. https://doi.org/10.17073/1997-308X-2015-2-8-14

D'yachkova LN, Dechko MM. Influence of Dispersed Microadditives on the Structure and Properties of Powder Carbon and High-Chromium Steel. *Powder Metallurgy and Functional Coatings.* 2015;(2):8–14. https://doi.org/10.17073/1997-308X-2015-2-8-14 (In Russ.)

8. Павленко Д.В. Особенности уплотнения спеченных титановых сплавов методами обработки давлением. *Обработка материалов давлением.* 2017;(1):173–180.

Pavlenko DV. Features of Sealing Sintered Titanium Alloys by Pressure Treatment Methods. *Obrabotka materialov davleniem.* 2017;(1):173–180. (In Russ.)

9. Бернштейн М.Л., Добаткин С.В., Капуткина Л.М., Прокошкин С.Д. *Диаграммы горячей деформации, структура и свойства сталей*. Москва: Металлургия; 1989. 544 с.

Bernshtein ML, Dobatkin SV, Kaputkina LM, Prokoshkin SD. *Diagrams of Hot Deformation, Structure and Properties of Steels*. Moscow: Metallurgiya; 1989. 544 p. (In Russ.)

10. Дьячкова Л.Н. Особенности формирования структуры и свойств порошковых сталей с добавками, активирующими диффузионные процессы при спекании. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*. 2020;65(1):45–53. https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-43-53

Dyachkova LN. Features of the Formation of the Structure and Properties of Powder Steels with Additives that Activate Diffusion Processes during Sintering. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series.* 2020;65(1):45–53. https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-43-53 (In Russ.)

11. Егоров М.С., Егорова Р.В., Месхи Б.Ч., Егоров С.Н. Развитие контактной поверхности при спекании порошковых сталей. *Металлург.* 2022;(10):74–79. https://doi.org/10.52351/00260827_2022_10_74

Egorov MS, Egorova RV, Meskhi BCh, Egorov SN. Development of Contact Surface during Sintering of Powder Steels. *Metallurg.* 2022;(10):74–79. https://doi.org/10.52351/00260827_2022_10_74 (In Russ.)

12. Dorofeyev VYu, Sviridova AN, Samoilov VA. Formation of Structure and Properties of Hot-Deformed Powder Steels Microalloyed with Sodium and Calcium in the Process of Thermal and Thermomechanical Treatment. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals.* 2021;62(6):723–731 https://doi.org/10.3103/S1067821221060080

13. Егоров М.С., Егорова Р.В., Егоров С.Н., Людмирский Ю.Г., Баранов И.В. Определение движущей силы миграции межчастичной поверхности сращивания порошковых сталей. *Заготовительные производства в машиностроении (кузнечно-прессовое, литейное и другие производства).* 2024;22(4):183–187. https://doi.org/10.36652/1684-1107-2024-22-4-183-187

Egorov MS, Egorova RV, Egorov SN, Lyudmirskiy YuG, Baranov IV. Determination of Driving Migration Force of Interparticle Splice Surface of Powder Steels. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii (kuznechno-pressovoe, liteinoe i drugie proizvodstva).* 2024;22(4):183–187. https://doi.org/10.36652/1684-1107-2024-22-4-183-187 (In Russ.)

14. Ахметов А.С., Еремеева Ж.В. Исследование структуры спеченных заготовок из порошковой смеси быстрорежущей стали Р6М5К5, содержащей диффузионно-легированный порошок. *Металлург.* 2022;(3):57–60.

Akhmetov AS, Eremeeva ZhV. Investigation of Structure of Sintered Blanks from Powder Mixture of R6M5K5 High-Speed Steel Containing Diffusion-Alloyed Powder. *Metallurg.* 2022;(3):57–60. (In Russ.)

15. Гостев А.С., Гостева Е.Г., Гулевский В.А. Роль нанопорошков в модифицировании сплавов. *Молодой ученый.* 2010;1(11):53–55.

Gostev AS, Gosteva EG, Gulevskii VA. The Role of Nanopowders in Alloy Modification. *Molodoi uchenyi.* 2010;1(11):53–55. (In Russ.)

16. Егоров М.С., Егорова Р.В., Егоров С.Н. Спеченные стали, модифицированные наноразмерным нитридом кремния. *Металлург.* 2023;(3):36–41. https://doi.org/10.52351/00260827_2023_03_36

Egorov MS, Egorova RV, Egorov SN. Sintered Steels Modified with Nanoscale Silicon Nitride. *Metallurg.* 2023;(3):36–41. https://doi.org/10.52351/00260827_2023_03_36 (In Russ.)

Об авторах:

Максим Сергеевич Егоров, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 2126-1642, ORCID, Scopus ID, aquavdonsk@mail.ru

Римма Викторовна Егорова, кандидат технических наук, доцент кафедры кибербезопасности информационных систем Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 8182-6940, ORCID, rimmaruminskaya@gmail.com

Владимир Юрьевич Лопатин, кандидат технических наук, доцент кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (119049, РФ, г. Москва, Ленинский пр., 4, стр. 1).

Заявленный вклад авторов:

М.С. Егоров: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.

Р.В. Егорова: научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

В.Ю. Лоптин: подготовка образцов для исследований механических свойств, анализ результатов скоростей охлаждения и построение математических зависимостей.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Maxim S. Egorov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Materials Science and Metal Technology, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code: 2126-1642, ORCID, Scopus ID, aquavdonsk@mail.ru

Rimma V. Egorova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Cybersecurity of Information Systems, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code: 8182-6940, ORCID, rimmaruminskaya@gmail.com

Vladimir Yu. Lopatin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Powder Metallurgy and Functional Coatings, National Research Technological University MISIS (4, Leninsky Aave., building 1, Moscow, 119049, Russian Federation).

Claimed Contributorship:

MS Egorov: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study, calculations, text preparation, conclusions formulation.

RV Egorova: academic advising, research results analysis, text revision, conclusions correction.

VYu Loptin: preparation of samples for studies of mechanical properties, analysis of the results of cooling rates and construction of mathematical dependencies.

Conflict of Interest Statement: **the authors do not have any conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 12.07.2024
Поступила после рецензирования / Revised 23.07.2024
Принята к публикации / Accepted 31.07.2024

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ
CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY





УДК 669.716
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-78-87

Оригинальное эмпирическое исследование



EDN: NTBOKI

Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства крупногабаритных изделий перспективной авиационной техники из сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu

В.С. Муратов[1], **Н.С. Якимов**[2] ✉
[1]Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
[2]АО «Авиаагрегат», г. Самара, Российская Федерация
✉ andrej.bakin2013@yandex.ru

Аннотация
Введение. Высокопрочные сплавы на алюминиевой основе системы легирования Al-Zn-Mg-Cu широко используются для изготовления деталей авиационной техники. Требует решения проблема достижения необходимого уровня механических свойств крупногабаритных деталей из сплавов этой системы легирования при термической обработке. Актуальны также исследования по оценке особенностей формирования коррозионных свойств в процессе реализации операций термической обработки. Цель данной работы — определить режимы термической обработки для достижения необходимых значений механических свойств и стойкости к коррозионному растрескиванию деталей из крупногабаритных деформированных заготовок сплавов системы легирования Al-Zn-Mg-Cu.
Материалы и методы. Исследования выполнены на деталях, изготавливаемых из поковок сплава 1933 и штампованных заготовок сплава В93пч. Определялось влияние режимов термической обработки на комплекс механических свойств (характеристики прочности, пластичности, твердости), микроструктуру и электропроводность сплавов. Испытания на растяжение реализовывались как на образцах, подвергнутых термической обработке после вырезки из поковок и штампованных заготовок, так и на образцах, вырезанных из массивных темплетов, которые подвергались термической обработке вместе с изделиями. Электропроводность позволяла оценивать степень пересыщенности твердого раствора и прогнозировать сопротивляемость сплава коррозионному растрескиванию.
Результаты исследования. Показана необходимость дифференцированного подхода к назначению длительности ступеней старения в зависимости от марки сплава, конфигурации и габаритов изделий, требований к уровню свойств. Предложены варианты и режимы термической обработки для изделий из сплавов 1933 и В93пч, обеспечивающие необходимый уровень механических свойств и сопротивляемости коррозионному растрескиванию.
Обсуждение и заключение. Установлены случаи несоответствия прочностных свойств в продольном и поперечном (по ширине) направлениях волокна деталей, изготавливаемых из крупногабаритных заготовок сплавов 1933 и В93пч. Предложены режимы и варианты термической обработки деталей, позволяющие достигать требуемых значений механических свойств и коррозионной стойкости, которые предусматривают сокращение в два раза (для сплава 1933) или увеличение на 25 % (для сплава В95пч) времени выдержки при ступенях старения.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, крупногабаритные изделия, термическая обработка, структура, свойства

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, устранение которых позволило повысить ее качество.

Для цитирования. Муратов В.С., Якимов Н.С. Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства крупногабаритных изделий перспективной авиационной техники из сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(3):78–87. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-78-87

Original Empirical Research

Influence of Heat Treatment Modes on the Structure and Properties of Large-Sized Products of Advanced Aviation Equipment Made of Alloys of the Al-Zn-Mg-Cu System

Vladimir S. Muratov[1], **Nikolai S. Yakimov**[2] ✉
[1]Samata State Technical University, Samara, Russian Federation
[2]Aviaagregat JSC, Samara, Russian Federation
✉ andrej.bakin2013@yandex.ru

Abstract
Introduction. High-strength aluminum-based alloys of the Al-Zn-Mg-Cu alloying system are commonly used in aircraft manufacturing. However, there is a need to address the issue of achieving the desired level of mechanical properties in large-scale parts made from these alloys during heat treatment. Additionally, studies on the evaluation of corrosion resistance during heat treatment are also essential. The aim of this work was to determine the modes of heat treatment to achieve the necessary values of mechanical properties and resistance to corrosion cracking of parts made of large-sized deformed blanks of alloys of the Al-Zn-Mg-Cu alloying system.
Materials and Methods. The research was conducted on parts made from forged 1933 alloy forgings and B93pch stamped blanks. The influence of heat treatment on the mechanical properties (strength, ductility, hardness) and microstructure, as well as electrical conductivity, was determined. Tensile tests were carried out both on samples subjected to heat treatment after cutting from forgings and stamped blanks, and on samples cut from massive templets that were heat treated together with the products. Electrical conductivity allowed us to assess the level of solid solution supersaturation and predict resistance to corrosion cracking.
Results. The results of the study showed the necessity of a differentiated approach to assigning the duration of aging stages, depending on the alloy grade, configuration, and dimensions of the products, as well as the requirements for the level of properties. Variants and modes of heat treatment were proposed for products made from alloys 1933 and B93pch, providing the necessary level of mechanical properties and resistance to corrosion cracking.
Discussion and Conclusion. Cases of inconsistency in strength properties in the longitudinal and transverse (in width) directions of the fiber of parts made from large-sized blanks of alloys 1933 and B93pch have been established. Modes and options for heat treatment of parts were proposed, allowing the achievement of the required values of mechanical properties and corrosion resistance. This provides for a halving of the aging time for alloy 1933 or an increase of 25% for alloy B95pch.

Keywords: aluminum alloys, large-sized products, heat treatment, structure, properties

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial team of the Journal and anonymous reviewers for their competent expertise and valuable recommendations for improving the quality of the article.

For citation. Muratov VS, Yakimov NS. Influence of Heat Treatment Modes on the Structure and Properties of Large-Sized Products of Advanced Aviation Equipment Made of Alloys of the Al-Zn-Mg-Cu System. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(3):78–87. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-78-87

Введение. При изготовлении модернизированных и перспективных образцов самолетов и вертолетов нового поколения прежде всего должны учитываться показатели надежности и безопасности полетов и перевозок [1], а также снижение массы изделия [2], для чего необходимо применение сплавов, обладающих высокой прочностью [3], сопротивлением усталости [4], вязкостью разрушения [5], стойкостью к коррозии [6]. В последние годы для производства новых перспективных гражданских самолетов SSJ-NEW, МС-21, Ту-214, Ил-96 и др. широко используются высокопрочные алюминиевые сплавы, в частности сплавы 1933 и В93пч. Они предназначены для изготовления ответственных силовых деталей самолета — рам, траверс, фитингов, тяг, шпангоутов, корпусов, лонжеронов [7]. Алюминиевые высокопрочные сплавы [8] системы легирования Al-Zn-Mg-Cu [9] являются одними из основных конструкционных материалов [10] для изготовления авиационной техники [11]. В эту группу входят сплавы марок В93 [12], В93пч [13], В95 [14], В95оч [15], В95пч [16], 1933. Сплав 1933 является модификацией сплава В93, не отличаясь от В93 по содержанию основных компонентов, сплав 1933 содержит добавку 0,12 % Zr вместо Fe. Такое изменение состава обеспечивает более высокие прочность, вязкость разрушения и сопротивление усталости, но сплав 1933 обладает более низкой прокаливаемостью, чем сплав В93 [17].

Одной из проблем успешной эксплуатации изделий из сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu является обеспечение достаточной коррозионной стойкости. Анализ процессов коррозионной повреждаемости алюминиевых сплавов показывает, что развитие разрушения в структуре при основных механизмах коррозии — коррозионном растрескивании (КР) и межкристаллитной повреждаемости — протекает идентично. Следует учитывать, что КР

присуще преимущественно дисперсионно-твердеющим сплавам на алюминиевой основе. Для сплавов, которым свойственна пониженная пересыщенность твердого раствора, КР не свойственно. Чувствительность к КР сплавов [15] определенной системы легирования зависит от количества легирующих элементов [17].

Подверженность алюминиевых сплавов КР надежно коррелирует со степенью пересыщенности твердых растворов и существенно меньше зависит от электронной концентрации и неоднородности электрохимического потенциала, которая возникает при распаде пересыщенных твердых растворов. Процесс замедленного разрушения, протекающий в слабоагрессивных средах (например, в воздухе, имеющем относительную влажность около 50 %), развивается при достаточно высоких значениях атомной концентрации элементов, используемых для легирования. Сплавы алюминия системы легирования Al-Zn-Mg-Cu имеют 10 балл КР, что означает коррозионную повреждаемость в слабо агрессивных средах на ненадрезанных образцах. При этом основным способом повышения стойкости к опасным видам коррозии является разработка и внедрение ступенчатых режимов смягчающего старения (Т2, Т3)[1].

Согласно [18], для алюминиевых сплавов, упрочняемых при термической обработке, получены надежные корреляционные связи показателей механических свойств (пределов текучести $\sigma_{0,2}$ и прочности $\sigma_в$, относительное удлинение δ) и значений удельной электрической проводимости γ. Выявлено, что у таких сплавов с уменьшением удельной электрической проводимости повышается прочность и уменьшается пластичность. Следует иметь в виду, что значения электрических свойств определяются не только химическим составом сплавов, но и особенностями состояния структуры кристаллической решетки, которые формируются режимами деформационной и термической обработок. Все отмеченное позволяет проводить оценку коррозионной стойкости по значениям электропроводности.

Существует проблема формирования заданных свойств крупногабаритных деталей из сплавов 1933 и В93пч, используемых для самолетов SSJ-NEW и Ту-214, после термической обработки. Необходимы также исследования по оценке особенностей формирования уровня механических и коррозионных свойств ответственных силовых деталей в процессе реализации операций термической обработки.

Цель авторов данной статьи — определить режимы термической обработки для достижения необходимых значений механических свойств и стойкости к коррозионному растрескиванию деталей из крупногабаритных деформированных заготовок сплавов системы легирования Al-Zn-Mg-Cu.

Материалы и методы. Исследования выполнены на деталях, изготовленных из крупногабаритных поковок сплава 1933, произведенных на Каменск-Уральском металлургическом заводе, и штампованных заготовок из сплава В93пч, произведенных на предприятии «Арконик СМЗ» (г. Самара). Габариты поковок представлены на рис. 1, габаритные размеры штампованных заготовок — 1790x980 мм. Химический состав исследуемых сплавов представлен в таблице 1.

Термическая обработка изделий проводилась в электрических печах ПА-56 и ПА-54, микроструктурные исследования выполнялись на световом микроскопе Olympus GX71, измерения электропроводности проводились прибором «Константа К6». Испытания механических свойств осуществлялись по ГОСТ 1497–84. Образцы для испытаний изготавливались из темплетов (вырезанных из заготовок) размеров 70×70×140 мм, которые подвергались термической обработке вместе с изделиями. Использовались пропорциональные цилиндрические образцы типа Ш с начальным диаметром 5 мм или 15 мм. Испытания образцов на растяжение выполнялись на установке ГУРМ-20. Для определения твердости был использован метод Бринелля (ГОСТ 9012–9, ИСО 410–82)[2].

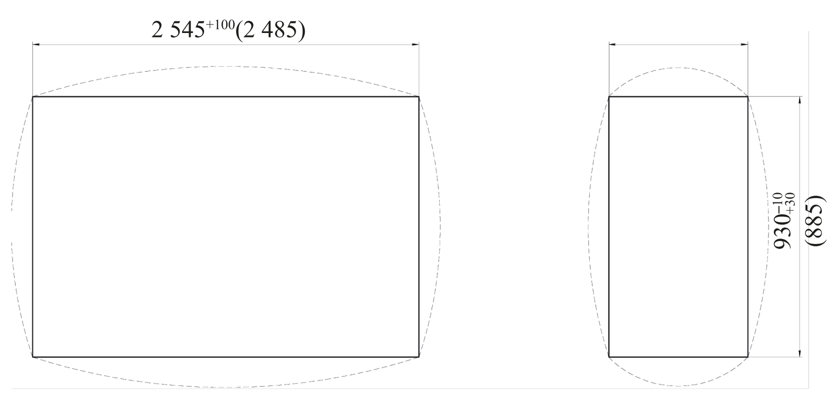


Рис. 1. Эскиз крупногабаритной поковки из сплава 1933

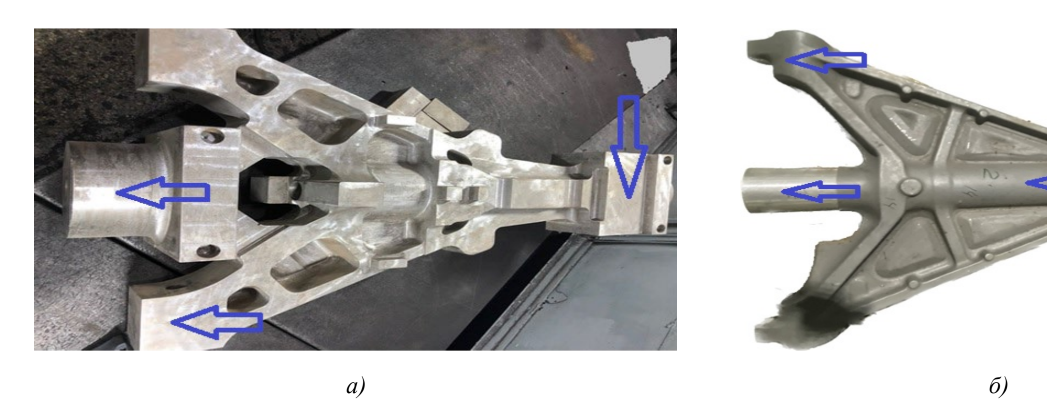
[1] ГОСТ 1497–84. *Металлы. Методы испытания на растяжение.* Москва: Стандартинформ; 2008. 26 с. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294852/4294852801.pdf (дата обращения: 29.04.2024).
[2] ГОСТ 9012–59. ИСО 410–82 *Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю.* Москва: Стандартинформ; 2008. 40 с. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294850/4294850482.pdf (дата обращения: 29.04.2024).

Таблица 1

Химический состав исследуемых сплавов (масс., %)

Сплав	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Be	Al
1933	0,02	0,09	0,9	0,01	1,8	0,01	6,5	0,4	0,04	0,001	Осн.
В93пч	–	0,31	1,0	–	1,9	–	6,7	0,01	–	–	Осн.

На рис. 2 показаны детали, подвергаемые упрочняющей термической обработке (стрелками указаны места замера электропроводности сплава).



а) *б)*

Рис. 2. Детали, подвергаемые термической обработке:
а — траверса из сплава 1933; *б* — рама амортизационной стойки из сплава В93пч

Результаты исследования. Исследования в состоянии поставки (после отжига) макроструктуры поковок и штампованных заготовок, изломов, выполненный ультразвуковой контроль не выявили недопустимых отклонений. Электропроводность сплава 1933 составляет 24,7 мСм/м, а для сплава В93пч — 23,5 мСм/м. На рис. 3 показана микроструктура сплава 1933 в состоянии поставки. Зеренная структура сплава не имеет ярко выраженного ориентированного характера.

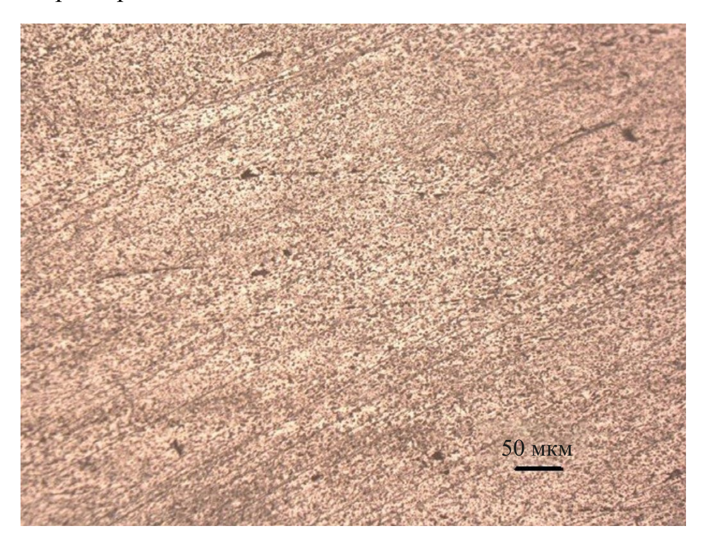


Рис. 3. Микроструктура сплава 1933 в состоянии поставки

Определены характеристики механических свойств на продольных и поперечных по ширине и поперечных по толщине образцах, которые изготавливались из поковки и штампованной заготовки. Термическая обработка образцов (типовой вариант) выполнялась по режимам: сплав 1933 — температура нагрева под закалку 470 °C, охлаждение в воде с температурой 75–85 °C, искусственное старение: 1 ступень — 110 °C (время выдержки 24 часа, охлаждение на воздухе), 2 ступень — 180 °C (время выдержки 10–12 часов, охлаждение на воздухе); сплав В93пч — температура нагрева под закалку 460 °C, время выдержки 180 минут, охлаждение в воде с температурой 75–85 °C, искусственное старение: 1 ступень — 120 °C (время выдержки — 8 часов, охлаждение на воздухе), 2 ступень — 170 °C (время выдержки — 8 часов, охлаждение на воздухе). Результаты исследований приведены в таблице 2. Из представленных данных следует, что значения получаемых после термической обработки образцов, вырезанных из поковок и штампованных заготовок, соответствуют требованиям нормативных документов (НД).

Таблица 2

Значения механических свойств термически обработанных образцов, вырезанных из поковки (сплав 1933) и штампованной заготовки (сплав В93пч)

Результаты механических свойств					Норма по НД			
Направление волокна	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	HB	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ,%, не менее	HB, не менее
Продольное	480 / 480	—— / 433	17,0 / 11,2	149 / 163	440–530 / 430–500	390–470	7,0 / 7,0	110
Поперечное по ширине	480 / 500	—— / 457	12,2 / 8,0		430–530 / 430–500	390–470	5,0 / 5,0	
Поперечное по толщине	490 / 470	–	8,1 / 3,5		420–500 / 430–500	–	3,0 / 3,0	

Примечание. В числителе — значения свойств для сплава 1933, в знаменателе — для сплава В93пч.

Технологический процесс изготовления рассматриваемых изделий является многостадийным, и после механической обработки упрочняющая термическая обработка проводится на крупногабаритных деталях со сложной геометрией. После термической обработки деталей по традиционным режимам было выявлено несоответствие показателей механических свойств НД. В этой связи исследован ряд режимов и вариантов термической обработки (таблица 3):

1 режим (1933) — типовой вариант термической обработки детали «траверса» из сплава 1933 по производственной инструкции;

2 режим (1933) — либо вариант повторной термической обработки, проводимой для исправления несоответствия уровня свойств после 1 режима (1933), либо вариант термической обработки вместо 1 режима (1933);

1 режим (В93) — типовой вариант термической обработки детали «рама» из сплава В93пч по производственной инструкции;

2 режим (В93) — либо вариант повторной термической обработки, проводимой для исправления несоответствия уровня свойств после 1 режима (В93), либо вариант термической обработки вместо 1 режима (В93).

Таблица 3

Режимы упрочняющей термической обработки деталей «траверса» из сплава 1933 и «рама» из сплава В93

Режим термической обработки	Закалка	Первая ступень старения	Вторая ступень старения
Режим№ 1 (1933)	T = 470 °C, температура начала отсчета — 455 °C, время выдержки — 250 мин., среда охлаждения — вода, $t_{воды}$ = 75–85 °C	T = 110 °C, время выдержки — 24 ч., среда охлаждения — воздух	T = 180 °C, время выдержки — 10–12 ч., среда охлаждения — воздух
Режим № 2 (1933)	T = 470 °C, температура начала отсчета — 455 °C, время выдержки — 250 мин., среда охлаждения — вода, $t_{воды}$ = 75–85 °C	T = 110 °C, время выдержки — 12 ч., среда охлаждения — воздух	T = 180 °C, время выдержки — 6 ч., среда охлаждения — воздух
Режим № 1 (В93)	T = 460 °C, температура начала отсчета — 445 °C, время выдержки — 180 мин., среда охлаждения — вода, $t_{воды}$ = 75–85 °C	T = 120 °C, время выдержки 8 ч., среда охлаждения — воздух	T = 170 °C, время выдержки — 8 ч., среда охлаждения — воздух
Режим № 2 (В93)	T = 460 °C, температура начала отсчета — 445 °C, время выдержки — 180 мин., среда охлаждения — вода, $t_{воды}$ = 75–85 °C	T = 120 °C, время выдержки — 10 ч., среда охлаждения — воздух	T = 175 °C, время выдержки — 10 ч., среда охлаждения — воздух

В таблице 4 приведены результаты оценки механических свойств после исследуемых режимов и вариантов термической обработки для сплава 1933. Режим № 2 (1933), представленный в таблице 3, позволяет получить требуемые механические свойства, соответствующие НД, также данный режим можно использовать в качестве повторной термической обработки для устранения негативных результатов после обработки по режиму № 1 (1933) — недопустимо низкий уровень прочности сплава в продольном и поперечном (по ширине) направлении волокна.

Таблица 4

Результаты испытаний механических свойств после упрочняющей термической обработки детали «траверса» из сплава 1933

Режим термической обработки	Механические свойства			
	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	НВ
Продольное направление волокна				
Режим № 1 (1933)	430	370	10,1	129
Режим № 2 (1933) (в варианте повторной обработки)	480	430	12,2	–
Режим № 2 (1933) (в варианте замены режима № 1)	480	400	16,1	138
Требования НД	440–530	380–480	Не менее 7,0	Не менее 110
Поперечное направление волокна (по ширине)				
Режим № 1 (1933)	420	370	13,2	129
Режим № 2 (1933) (в варианте повторной обработки)	470	450	11,3	–
Режим № 2 (1933) (в варианте замены режима № 1)	480	410	11,1	138
Требования НД	430–530	370–470	Не менее 4,0	Не менее 110
Поперечное направление волокна (по толщине)				
Режим № 1 (1933)	430	–	16,3	129
Режим № 2 (1933) (в варианте повторной обработки)	480	–	16,2	–
Режим № 2 (1933) (в варианте замены режима № 1)	460	–	10,4	138
Требования НД	420–500	–	Не менее 2,5	Не менее 110

В таблице 5 приведены результаты оценки механических свойств после исследуемых режимов и вариантов термической обработки для сплава В93пч.

Таблица 5

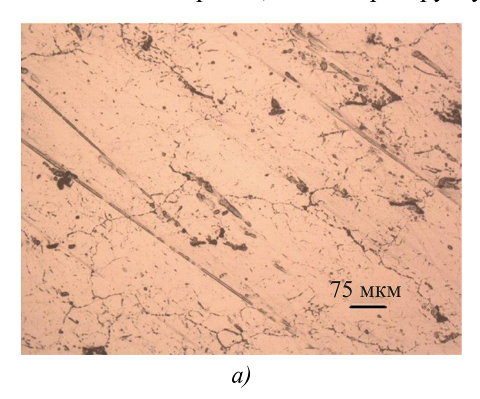
Результаты испытаний механических свойств после упрочняющей термической обработки детали «рама» из сплава В93пч

Режим термической обработки	Механические свойства		
	$\sigma_в$, МПа	δ, %	НВ
Продольное направление волокна			
Режим № 1 (В93)	510	12,4	163
Режим № 2 (В93) (в варианте повторной обработки)	450	15,5	121
Режим № 2 (В93) (в варианте замены режима № 1)	480	13,0	143
Требования НД	440–500	Не менее 7,0	Не менее 110
Поперечное направление волокна (по ширине)			
Режим № 1 (В93)	510	7,2	163
Режим № 2 (В93) (в варианте повторной обработки)	440	13,5	121
Режим № 2 (В93) (в варианте замены режима № 1)	480	8,0	143
Требования НД	430–500	Не менее 4,0	Не менее 110
Поперечное направление волокна (по толщине)			
Режим №1 (В93)	490	4,0	163
Режим № 2 (В93) (в варианте повторной обработки)	431	9,0	121
Режим № 2 (В93) (в варианте замены режима № 1)	480	8,0	143
Требования НД	420–500	Не менее 3,0	Не менее 110

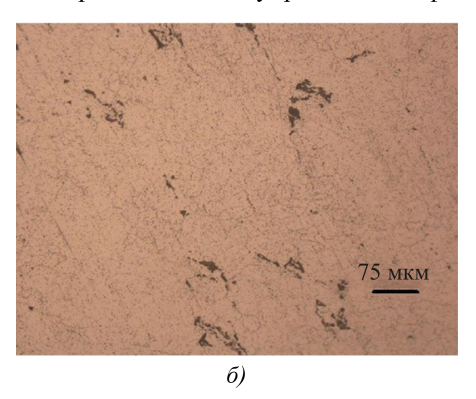
Как видно по представленным данным, режим № 1 (В93) не обеспечивает требуемого уровня прочностных свойств в продольном и поперечном (по ширине) направлениях волокна детали. Уровень свойств завышен. В то же время режим № 2 (В93) позволяет достигать необходимых значений свойств при его реализации как в варианте повторной обработки, так и в варианте замены режима № 1.

Таким образом, наиболее чувствительными к влиянию режимов термической обработки в крупногабаритных изделиях из сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu являются продольное и поперечное (по ширине) направления волокна. Достигнуть требуемого уровня прочностных свойств возможно коррекцией режимов старения сплавов — либо в сторону сокращения (сплав 1933), либо в сторону увеличения (сплав В93пч) длительности.

Выполненные микроструктурные исследования подтвердили отсутствие признаков пережога после закалки при обработке по всем режимам и вариантам термической обработки. На рис. 4 представлена микроструктура исследуемых сплавов после упрочняющей термической обработки по режимам № 2 (1933) и № 2 (В93пч) (в вариантах замены режима № 1). Поскольку при термической обработке сплава В93пч использовано существенно более длительное старение, то в микроструктуре выявляются дисперсные частицы упрочняющих фаз.



а)



б)

Рис. 4. Структура сплавов после упрочняющей термообработки по режимам:
а — режим № 2 (1933); *б* — режим № 2 (В93пч) (в вариантах замены режима № 1)

Авторами выполнены исследования электропроводности сплавов 1933 и В93пч после различных режимов и вариантов термической обработки. Результаты исследования позволяли оценивать по методике ТУ 1-804-475-2008. П.1.22 степень распада пересыщенного твердого раствора при различных режимах старения, а также сопротивляемость сплава коррозионному растрескиванию. Согласно требованиям НД, для подтверждения удовлетворительной коррозионной стойкости на полуфабрикатах из сплава 1933 в состоянии Т2 и Т3 показатель электропроводности (ϒ) должен быть не менее 22,5 мСм/м в состоянии Т2 и не менее 23,5 мСм/м в состоянии Т3; для сплава В93пч показатель электропроводности должен лежать в пределах 21–25 мСм/м. Измерения электропроводности проводились прибором на наиболее массивных участках детали (указаны стрелками на рис. 2). В состоянии поставки электропроводность сплава В93пч составляла 22,7–23,8 мСм/м. Результаты измерения представлены в таблице 6.

Таблица 6

Значения электропроводности на различных этапах упрочняющей термической обработки сплавов 1933 и В93пч

Режим термической обработки	Состояния заготовки детали в процессе термообработки	Электропроводность, мСм/м
Режим № 1 (1933) Режим № 1 (В95)	После закалки	18,5–18,6
	После 1 стадии старения	19,6–19,8
	После 2 стадии старения	25,1–25,9 23,5–23,6
Режим № 2 (1933) Режим № 2 (В95) (в варианте повторной обработки)	После закалки	18,5–18,6
	После 1 стадии старения	19,6–19,7
	После 2 стадии старения	25,1–25,7 24,2–25,0
Режим № 2 (1933) Режим № 2 (В95) (в варианте замены режима № 1)	После закалки	18,5–18,7
	После 1 стадии старения	19,6–19,7
	После 2 стадии старения	25,2–25,7 24,3–25,0

Как следует из приведенных данных, по мере развития процессов распада пересыщенного твердого раствора при старении имеет место увеличение электропроводности сплава, что связано с уменьшением пересыщенности кристаллической решетки атомами легирующих элементов. При этом несмотря на сокращенные длительности старения на первой и второй стадиях при реализации режима № 2 (1933) значения электропроводности практически совпадают со значениями после режима № 1 (1933). Это свидетельствует о достаточно высокой степени распада пересыщенного твердого раствора на стадиях старения при обработке по режиму № 2 (1933). Значения электропроводности сплава подтверждают его достаточную сопротивляемость КР. Электропроводность сплава В93пч также соответствует требованиям НД.

Обсуждение и заключение. При проведении упрочняющей термической обработки деталей самолетов SSJ-NEW и ТУ 214, изготавливаемых из крупногабаритных поковок сплава 1933 и штампованных заготовок сплава В93пч, выявлены случаи несоответствия прочностных свойств в продольном и поперечном (по ширине) направлениях волокна деталей.

Показано, что в зависимости от конфигурации и габаритов деталей уровни требуемых характеристик механических свойств длительности ступеней старения должны назначаться дифференцированно. Предложены режимы и варианты термической обработки деталей, использующие сокращенное (для сплава 1933) или увеличенное (для сплава В95пч) время выдержки при ступенях старения, позволяющее обеспечить необходимый уровень механических свойств и сопротивляемости коррозионному растрескиванию крупногабаритных изделий.

Проведенные исследования влияния реализации стадий термической обработки на формирование уровня электропроводности сплава 1933 подтверждают достижение достаточного уровня распада пересыщенного твердого раствора при предлагаемой сокращенной продолжительности старения для сплава 1933, что обеспечивает необходимые уровни прочности и сопротивления коррозии. Увеличенная длительность старения сплава В93пч обеспечивает достаточный уровень его электропроводности.

Список литературы / References

1. *Машиностроение. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы.* Энциклопедия. В 40 т. Т. II–3. Москва: Машиностроение; 2001. 880 с.

Mechanical Engineering. Non-Ferrous Metals and Alloys. Composite Metal Materials. Encyclopedia. In 40 vol. Vol. II–3. Moscow: Mashinostroenie; 2001. 880 p. (In Russ.)

2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года. *Авиационные материалы и технологии.* 2012;(S):7–17.

Kablov EN. Strategical Areas of Developing Materials and Their Processing Technologies for the Period up to 2030. *Aviation Materials and Technologies.* 2012;(S):7–17. (In Russ.)

3. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Оглодкова Ю.С., Оглодков М.С. Опыт и перспективы применения алюминий-литиевых сплавов в изделиях авиационной и космической техники. *Металлург.* 2021;(1):62–70. URL: https://library.bmstu.ru/Publications/Home/AuthorPublications/c00e1744-db59-4d2f-9f79-1e9e757d5105 (дата обращения: 29.04.2024).

Kablov EN, Antipov VV, Odolodkova YuS, Odolodkov MS. Experience and Application Prospects of Aluminum-Lithium Alloys in Aircraft and Space Technology. *Metallurg.* 2021;(1):62–70. URL: https://library.bmstu.ru/Publications/Home/AuthorPublications/c00e1744-db59-4d2f-9f79-1e9e757d5105 (accessed: 29.04.2024). (In Russ.)

4. Фридляндер И.Н. *Воспоминания о создании авиакосмической и атомной техники из алюминиевых сплавов*. 2-е изд. Москва: Наука; 2006. 275 с. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/fridlyander_vospominaniya_2006/p12/ (дата обращения: 29.04.2024).

Fridlyander IN. *Memories of the Creation of Aerospace and Nuclear Technology from Aluminum Alloys*. 2-nd ed. Moscow: Nauka; 2006. 275 p. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/fridlyander_vospominaniya_2006/p12/ (accessed: 29.04.2024). (In Russ.)

5. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы. *Авиационные материалы и технологии.* 2012;(S):167–182.

Antipov VV, Senatorova OG, Tkachenko EA, Vakhromov PO. Aluminium Wrought Alloys. *Aviation Materials and Technologies.* 2012;(S):167–182. (In Russ.)

6. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В., Попов В.И., Блинова Н.Е. Разработка, освоение и применение особопрочных сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu-Zr для авиационной и ракетной техники. В: *Труды международной научно-технической конференции «Развитие фундаментальных основ материаловедения легких сплавов и композиционных материалов на их основе для создания изделий аэрокосмической и атомной техники».* Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»; 2013. С. 51.

Antipov VV, Senatorova OG, Sidelnikov VV, Popov VI, Blinova NE. Development and Application of High-Strength Alloys of the Al-Zn-Mg-Cu-Zr System for Aviation and Rocket Technology. In: *Proceedings of the*

International scientific and technical conference "Development of the fundamentals of materials science of light alloys and composite materials based on them for the creation of aerospace and nuclear engineering products". Moscow: All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials of the National Research Center "Kurchatov Institute"; 2013. P. 51. (In Russ.)

7. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов — гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники. *Авиационные материалы и технологии.* 2001:(1);3–8.

Kablov EN. Quality Control of Materials is a Guarantee of the Safety of Aviation Equipment Operation. *Aviation Materials and Technologies.* 2001:(1);3–8. (In Russ.)

8. Сенаторов О.Г., Антипов В.В., Бронз А.В., Сомов А.В., Серебренников Н.Ю. Высокопрочные и сверхпрочные сплавы традиционной системы Al-Zn-Mg-Cu, их роль в технике и возможности развития. *Технология легких сплавов.* 2016;4:43–49.

Senatorov OG, Antipov VV, Bronz AV, Somov AV, Serebrennikova NYu. High-Strength and Super High-Strength Conventional Al-Zn-Mg-Cu System-Based Alloys, Their Role in Engineering and Possibility of Development. *Tekhnologiya legkikh splavov.* 2016;4:43–49. (In Russ.)

9. Kai Wen, Yunqiang Fan, Guojun Wang, Longbin Jin, Xiwu Li, Zhihui Li, et al. Aging Behavior and Precipitate Characterization of a High Zn-Containing Al–Zn–Mg–Cu Alloy with Various Tempers. *Materials & Design.* 2016;101:16–23. http://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.150

10. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года». *Авиационные материалы и технологии*. 2015;1(34):3–33. URL: https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2015/2015_1_1_1.pdf (дата обращения: 29.04.2024).

Kablov EN. Innovative Developments of FSUE "VIAM" SSC of RF on Realization of "Strategic Directions of the Development of Materials and Technologies of Their Processing for the Period until 2030". *Aviation Materials and Technologies*. 2015;1(34):3–33. URL: https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2015/2015_1_1_1.pdf (accessed: 29.04.2024). (In Russ.)

11. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники. *Авиационные материалы и технологии.* 2017;(S):186–194. https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194

Antipov VV. Prospects for Development of Aluminium, Magnesium and Titanium Alloys for Aerospace Engineering. *Aviation Materials and Technologies.* 2017;(S):186–194. https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194 (In Russ.)

12. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки. *Вестник Российской академии наук.* 2020;90(4):331–334. https://doi.org/10.31857/S0869587320040052

Kablov EN. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing. *Herald of the Russian Academy of Sciences.* 2020;90(4):331–334. https://doi.org/10.31857/S0869587320040052 (In Russ.)

13. Фридляндер И.Н. Современные алюминиевые, магниевые сплавы и композиционные материалы на их основе. *Металловедение и термическая обработка металлов.* 2002;(7):24–29.

Fridlyander IN. Modern Aluminum, Magnesium Alloys and Composite Materials Based on Them. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov.* 2002;(7):24–29. (In Russ.)

14. Нечайкина Т.А., Блинова Н.Е., Иванов А.Л., Козлова О.Ю., Кожекин А.Е. Исследование влияния режимов гомогенизации и закалки на структуру и механические свойства раскатных колец из сплава В95оч-Т2. *Труды ВИАМ.* 2018;10(70):27–36. https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-10-27-36

Nechaykina TA, Blinova NE, Ivanov AL, Kozlova OYu, Kozhekin AE. Research of the Effect of Homogenization and Quench Hardening Modes on the Structure and Mechanical Properties of Retail Rings From Alloy B95o.ch.-T2. *Proceedings of VIAM.* 2018;10(70):27–36. https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-10-27-36 (In Russ.)

15. Сенаторова О.Г., Серебренникова Н.Ю., Антипов В.В., Иванов А.Л., Попов В.И. Исследование структуры и свойств плиты толщиной 80 мм из сплава В95 пчТ2. *Технология легких сплавов.* 2016;(2):37–42.

Senatorova OG, Serebrennikova NYu, Antipov VV, Ivanov AL, Popov VI. Investigation of the Structure and Properties of an 80 mm Thick Plate Made of B95 p.chT2 Alloy. *Tekhnologiya legkikh splavov.* 2016;(2):37–42. (In Russ.)

16. Нечайкина Т.А., Оглодков М.С., Иванов А.Л., Козлова О.Ю., Яковлев С.И., Шляпников М.А. Особенности закалки широких обшивочных плакированных листов из алюминиевого сплава В95пч на линии непрерывной термической обработки. *Труды ВИАМ.* 2021;(11(105)):25–33. https://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-11-25-33

Nechaikina TA, Oglodkov MS, Ivanov AL, Kozlova OYu, Yakovlev SI, Shlyapnikov MA. Features of Quenching of Wide Cladding Clad Sheets Made of Aluminum Alloy B95p.ch on a Continuous Heat Treatment Line. *Proceedings of VIAM.* 2021;(11(105)):25–33. https://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-11-25-33 (In Russ.)

17. Ovsyannikov BV. Beware of Grain Refinement. *Materials Science Forum.* 2014;794–796:143–148. http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.794-796.143

18. Леонов В.В., Никифоров А.Г., Ковалева А.А. Выявление корреляционных взаимосвязей между физическими свойствами алюминиевых сплавов. *Фундаментальные исследования.* 2017;(7):44–48. URL: https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41582 (дата обращения: 29.04.2024).

Leonov VV, Nikiforov AG, Kovaleva AA. Identification of Correlations between Physical Properties of Aluminum Alloys. *Fundamental research.* 2017;(7):44–48. URL: https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41582 (accessed: 29.04.2024). (In Russ.)

Об авторах:

Владимир Сергеевич Муратов, доктор технических наук, профессор кафедры металловедения, порошковой металлургии, наноматериалов Самарского государственного технического университета (443100, Российская Федерация, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244), SPIN-код: 1341-1718, ORCID, ResearcherID, muratov1956@mail.ru

Николай Сергеевич Якимов, кандидат технических наук, ведущий инженер АО «Авиаагрегат» (443009, Российская Федерация, г. Самара, Заводское шоссе, 55), SPIN-код: 7371-3706, ORCID, ResearcherID, andrej.bakin2013@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

В.С. Муратов: научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Н.С. Якимов: формулирование основной концепции, целей и задач исследования, проведение испытаний, подготовка текста, формулирование выводов.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Vladimir S. Muratov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Metallurgy, Powder Metallurgy, Nanomaterials, Samara State Technical University (244, Molodogvardeyskaya St., Samara, 443100, RF), SPIN-code: 1341–1718, ORCID, ResearcherID, muratov1956@mail.ru

Nikolai S. Yakimov, Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer of Aviaagregat JSC (55, Zavodskoe highway, Samara, 443009, RF), SPIN-code: 7371-3706, ORCID, ResearcherID, andrej.bakin2013@yandex.ru

Claimed Contributorship:

VS Muratov: academic advising, research results analysis, text revision, conclusions correction.

NS Yakimov: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study, conducting tests, text preparation, conclusions formulation.

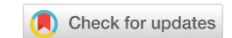
Conflict of Interest Statement: **the authors do not have any conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 29.05.2024
Поступила после рецензирования / Revised 13.06.2024
Принята к публикации / Accepted 17.06.2024

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY





УДК 621.762
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-88-96

Оригинальное эмпирическое исследование

Влияние химического состава абразива и прочности межслойных границ на ударно-абразивную износостойкость слоистых композиционных материалов



EDN: ZNNPJE

М.А. Исмаилов
Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Российская Федерация
 al_myalim@mail.ru

Аннотация

Введение. Детали машин и механизмов, эксплуатируемые в различных условиях, при контакте с абразивными частицами быстро изнашиваются и выходят из строя. Например, при перекачке тяжелых буровых растворов из-за интенсивного изнашивания детали гидравлического блока бурового насоса через 5–10 часов работы необходимо менять. Анализ научных публикаций и опыт эксплуатации буровых насосов указывают на то, что существующие способы повышения износостойкости конструкционных сталей при абразивном и ударно-абразивно воздействии малоэффективны. Поэтому актуальной задачей является повышение этих свойств в результате совершенствования конструкции и технологии изготовления деталей буровых насосов, что позволит снизить затраты на производство их комплектующих, ремонт и обслуживание. Целью данной работы является исследование влияния химического состава абразивных частиц и прочности межслойных границ «износостойкая сталь — резина» на ударно-абразивную износостойкость слоистых композиционных материалов.

Материалы и методы. Слоистые композиционные материалы (СКМ) состояли из износостойкого слоя стали 40Х и резинового слоя бутилкаучука марки БК-1675Н. Ударно-абразивную износостойкость СКМ рассматривали в соответствии с ГОСТ 23.207–79 на специальной установке. В качестве абразивного материала была взята смесь оксида кремния и алюминия. Изучение микроструктуры поверхности СКМ, химического и фазового состава абразивного порошка проводили на оборудовании ЦКП «Нанотехнологии» ЮРГПУ (НПИ). Адгезионную прочность межслойных границ СКМ исследовали на разработанной для этой цели установке.

Результаты исследования. В результате исследований СКМ на ударно-абразивный износ выявлено, что их износостойкость в несколько раз выше, чем у сталей, используемых для изготовления деталей, устойчивых к воздействию абразивных частиц. Выявлено, что в процессе изнашивания твердые частицы оксидов алюминия и кремния активно внедряются в поверхность СКМ, увеличивая интенсивность износа, тогда как менее твердые частицы алюминатов магния и кальция при ударе разрушаются и закрепляются в образовавшихся дефектах на поверхности СКМ, незначительно снижая интенсивность износа. Установлено, что при соединении слоев СКМ методом горячей вулканизации под давлением и концентрации меди 25–30 % в спеченной стали П40Х адгезионная прочность повышается до 0,93 МПа.

Обсуждение и заключение. Разработанные СКМ позволяют не только повысить абразивную и ударно-абразивную износостойкость, но и в качестве износостойкого слоя использовать более дешевые марки стали. Предложенный способ соединения слоев СКМ из спеченных сталей исключает необходимость в дополнительной механической обработке поверхности и в использовании специальных клеящих составов. Такие СКМ могут использоваться в узлах деталей машин и механизмов, которые эксплуатируют в условиях абразивного и ударно-абразивного износа.

Ключевые слова: ударно-абразивная износостойкость, слоистый композиционный материал, буровые насосы, упруго-диссипативная подложка, адгезионная прочность

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, устранение которых позволило повысить ее качество.

Для цитирования. Исмаилов М.А. Влияние химического состава абразива и прочности межслойных границ на ударно-абразивную износостойкость слоистых композиционных материалов. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(3):88–96. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-88-96

Original Empirical Research

Influence of Chemical Composition of Abrasive Materials and Strength of Interlayer Boundaries on Impact and Abrasive Wear Resistance of Layered Composite Materials

Markiz A. Ismailov

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

✉ al_myalim@mail.ru

Abstract

Introduction. Parts of machines and mechanisms that operate in various conditions and come into contact with abrasive particles can quickly wear out and fail. This is especially true for the hydraulic block of a drilling pump, which, due to intense wear, must be replaced after only 5–10 hours of use when pumping heavy drilling fluids. The analysis of scientific literature and experience with drilling pump operation shows that current methods for increasing the wear resistance of structural steels against abrasive and impact-abrasive forces are ineffective. Thus, it is an urgent task to enhance these properties through improved design and manufacturing techniques for drilling pump components, which would reduce the cost of production, repairs, and maintenance. The aim of this work is to study the effect of chemical composition of abrasive particles and the strength of the interlayer boundaries of “wear-resistant steel — rubber” on the impact and abrasive wear resistance of layered composite materials.

Materials and Methods. Layered composite materials (LCMs) consisted of: a wear-resistant layer of 40X steel and a rubber layer of BK-1675N butyl rubber. The impact and abrasive wear resistance of the LCMs was studied in accordance with GOST 23.207-79 on a special installation. A mixture of silicon oxide and aluminum was used as an abrasive material. The microstructure of the SCMs surface, as well as the chemical and phase composition of the abrasive particles, were analyzed using equipment from the Common Use Center “Nanotechnology” of Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI). The adhesive strength between the layers of the LCMs was determined using a custom-built installation.

Results. The results of the study revealed that the wear resistance of the LCMs was several times higher than that of steels used for manufacturing parts resistant to abrasive particles. During the wear process, solid particles of aluminum and silicon oxides actively embed in the surface of the LCMs, increasing the intensity of wear. In contrast, less solid particles of magnesium and calcium aluminates were destroyed and fixed in formed defects on the LCM surface, slightly reducing wear intensity. It was also found, that, when SCM layers were joined by hot vulcanization under pressure with a copper concentration of 25–30% in sintered P40X steel, adhesive strength increased to 0.93 MPa.

Discussion and Conclusion. The developed SCMs make it possible not only to increase the abrasive and impact-abrasive wear resistance, but also to use cheaper grades of steels as a wear-resistant layer. The proposed method of joining the SCM layers from sintered steels eliminates the need for additional surface machining and the use of special adhesives. Such SCMs can be used in the assemblies of machine parts and mechanisms that are operated in conditions of abrasive and shock-abrasive wear.

Keywords: impact and abrasive wear resistance, layered composite material, drilling pumps, elastic-dissipative substrate, adhesive strength

Acknowledgements. The author would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For citation. Ismailov MA. Influence of Chemical Composition of Abrasive Materials and Strength of Interlayer Boundaries on Impact and Abrasive Wear Resistance of Layered Composite Materials. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(3):88–96. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-88-96

Введение. Основной причиной снижения эксплуатационной надежности деталей и механизмов в горнодобывающей [1], нефтегазовой [2], строительной, дорожной и перерабатывающей промышленности [3] является воздействие таких видов изнашивания, как абразивный, ударно-абразивный, коррозионный, усталостный и другие [4]. Например, большинство научных исследований и опыт эксплуатации буровых насосов указывают на то, что детали гидравлического блока в большей степени подвержены воздействию абразивного и ударно-абразивного изнашивания.

Анализ научных публикаций показал, что материалы, разрабатываемые для работы в условиях ударно-абразивного изнашивания, должны обладать высокой твердостью, вязкостью и износостойкостью [5]. Однако опыт эксплуатации буровых насосов [6] указывает на то, что одной из причин снижения эксплуатационной надежности деталей клапана является низкая ударно-абразивная износостойкость конструкционных сталей [7] и уплотнительных упругих элементов [8]. Поэтому актуальной задачей является разработка технологии получения слоистых композиционных материалов, в которых один из слоев выполнен из износостойкого материала, а другой — из упруго-диссипативного, например, на основе резиновых смесей, позволяющий поглощать часть воздействующей на деталь энергии удара.

Материалы и методы. Для испытаний изготовили слоистые образцы, один слой которых выполнен из износостойкой стали (рис. 1, поз. 1), а другой, упругий слой — из бутилкаучука марки БК-1675Н (рис. 1, поз. 2). В качестве износостойкой стали использовали:

– катанную сталь 40Х, которую подвергли термической обработке — закалке при 860 °С с охлаждением в масле и отпуску при 200 и 570 °С с охлаждением на воздухе;

– спеченную и горячедеформированную сталь П40Х.

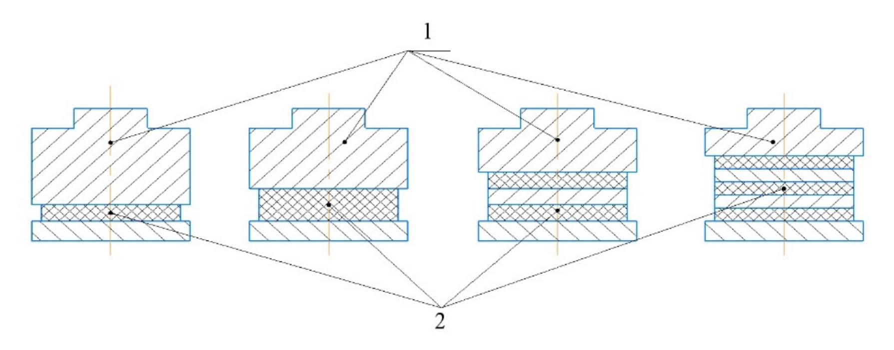


Рис. 1. Образцы СКМ для испытания на ударно-абразивную износостойкость:
1 — износостойкий материал; 2 — упруго-диссипативная подложка

Испытание на ударно-абразивную износостойкость слоистых образцов проводили в соответствии с ГОСТ 23.207–79[1] на специальной установке [9]. Принцип действия установки основан на принудительном ударении образца по контртелу через слой просыпающегося абразива. Износ образцов оценивался по потерянной массе после 1000 ударов на аналитических весах OHAUS Pioneer PA [10].

В ГОСТ 23.207–79 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний машиностроительных материалов на ударно-абразивное изнашивание» для сравнения абразивной и ударно-абразивной износостойкости различных материалов в качестве абразива рекомендуется использовать карбид кремния. Однако применительно к конкретным условиям эксплуатации машин и механизмов ГОСТом допускается использование соответствующего абразивного материала. Например, для увеличения плотности буровых растворов используют различные утяжелители, выбор которых будет зависеть от конкретных условий бурения. В случае, когда требуются утяжелители с большей абразивностью, используют различные абразивные материалы [11]. Поэтому в качестве абразива при испытании на ударно-абразивную износостойкость использовали смесь оксидов кремния и алюминия.

Микроструктуру поверхности СКМ после испытания на ударно-абразивную износостойкость, рентгенографические исследования и качественный фазовый анализ абразивного порошка проводили в ЦКП «Нанотехнологии» ЮРГПУ (НПИ).

Для исследования адгезионной прочности образцы из катанной стали 40Х, спеченной и горячедеформированной стали П40Х склеивали с резиной двумя способами: клеем на основе хлоропренового каучука и методом горячей вулканизации под давлением при температуре 160 °С в течение 20 мин. без использования клея [12]. Адгезионную прочность межслойных границ СКМ исследовали на разработанной для этой цели установке [13].

[1] ГОСТ 23.207–79. *Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний машиностроительных материалов на ударно-абразивное изнашивание.* URL: https://docs.cntd.ru/document/1200010682 (дата обращения: 22.05.2024).

Результаты исследования. Испытания с энергией удара от 3 до 23 Дж показали, что образцы из стали 40Х после улучшения изнашиваются значительно больше, чем образцы после низкого отпуска (рис. 2, кривые 1 и 3). При этом использование упруго-диссипативной подложки (УДП) позволило снизить износ в 1,5–2 раза (рис. 2, кривые 2 и 4), по сравнению с образцами, которые испытывали без подложки (рис. 2, кривые 1 и 3).

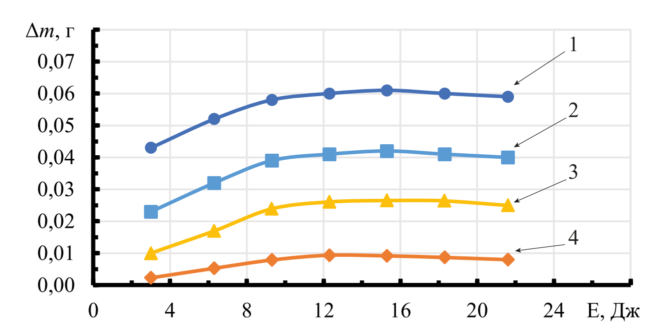
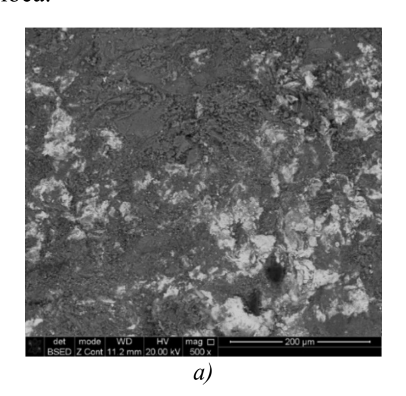
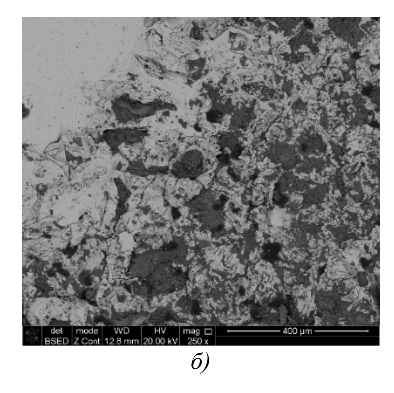


Рис. 2. Зависимость износа (Δm) от энергии удара (E) без (1, 3) и с резиновой подложкой (2, 4) СКМ с рабочим слоем из стали 40Х после улучшения (1, 2) и низкого отпуска (3, 4)

На рис. 2 видно, что при увеличении энергии удара интенсивность износа образцов изменяется, и можно выделить два участка. На первом при увеличении энергии удара до 12 Дж износ образцов возрастает в результате внедрения абразивных частиц в их поверхность (рис. 3 *а*) и в межзеренные границы (рис. 3 *б*), что способствует интенсивному скалыванию микрообъемов металла. На втором участке при дальнейшем увеличении энергии удара в результате пластической деформации верхний слой образца упрочняется, а абразивные частицы, разрушаясь, шаржируют его поверхность, вследствие чего происходит незначительное замедление интенсивности износа.



а)



б)

Рис. 3. Микроструктура поверхности рабочего слоя из улучшенной стали 40Х:
а — в установившемся режиме изнашивания; *б* — на стадии интенсивного изнашивания

Рентгенофазовый анализ показал, что используемый абразивный порошок преимущественно состоит из оксидов алюминия и кремния, алюминатов магния и кальция (рис. 4). Фазовый состав абразива после испытаний на износостойкость не изменился.

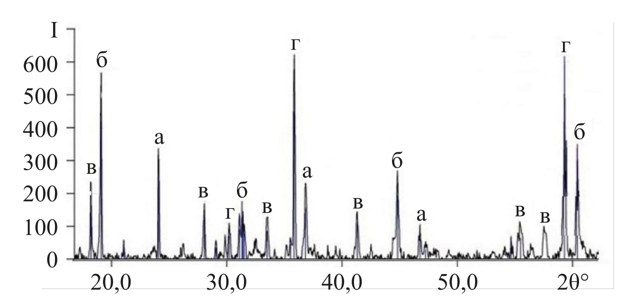
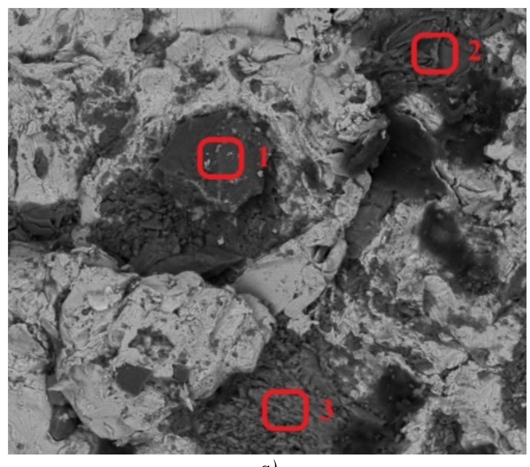


Рис. 4. Фазовый состав абразивного порошка, использованного при испытаниях на ударно-абразивный износ:
а — SiO2; *б* — MgAl2O4; *в* — CaAl2O4; *г* — Al2O3

После испытания ударную износостойкость на поверхности колец из стали 40Х имеются участки с частицами оксидов кремния и алюминия, которые, внедряясь в поверхность образца, образуют лунки и активируют процесс разрушения на начальной стадии (рис. 5 *а*). Частицы алюмината магния (рис. 5 *а*, поз. 2) из-за меньшей твердости (по шкале Мооса 7,5–8), по сравнению с частицами оксида алюминия (твердость по шкале Мооса 9), при увеличении энергии удара частично внедряются в поверхность образца, а большая их часть разрушается.

Частицы алюмината кальция (рис. 5 *а*, поз. 3) из-за низкой твердости при всех значениях энергии удара активно шаржируют поверхность СКМ (рис. 3 *а*). Химический состав поверхности испытания в зоне расположения частиц абразива показан на рис. 5 *б–ж*.



а)

Element	Weight %	MDL	Atomic %	Error %
C K	3,4	2,30	5,8	31,7
O K	45,8	0,35	59,5	10,3
Mg K	0,7	0,15	0,6	17,0
Al K	2,7	0,13	2,1	8,9
Si K	38,1	0,11	28,2	5,1
K K	1,0	0,25	0,5	19,3
Ca K	0,9	0,24	0,5	21,2
Ti K	1,0	0,34	0,4	18,2
Mn K	0,8	0,38	0,3	29,0
Fe K	5,6	0,41	2,1	7,1

б)

в)

Element	Weight %	MDL	Atomic %	Error %
O K	42,8	0,08	57,0	9,2
Mg K	15,4	0,06	13,5	7,0
Al K	31,9	0,07	25,2	6,7
Cl K	0,4	0,08	0,2	19,7
K K	0,3	0,10	0,1	21,8
Ca K	2,1	0,11	1,1	5,5
Cr K	4,6	0,16	1,9	4,2
Mn K	0,3	0,20	0,1	35,0
Fe K	2,2	0,19	0,8	6,5

г)

д)

Element	Weight %	MDL	Atomic %	Error %
C K	6,1	0,34	10,5	12,7
O K	45,5	0,12	58,8	10,5
Na K	1,4	0,09	1,3	11,4
Mg K	1,5	0,05	1,2	9,1
Al K	18,6	0,05	14,2	6,3
Si K	0,6	0,05	0,4	10,6
S K	0,3	0,05	0,2	15,7
Cl K	0,4	0,05	0,3	11,4
Ca K	24,7	0,07	12,7	2,4
Fe K	0,9	0,12	0,3	8,7

е)

ж)

Рис. 5. Микроструктура (а) и распределение компонентов в абразивных частицах на поверхности улучшенной стали 40Х на стадии интенсивного износа: *б*, *в* — оксида кремния; *г*, *д* — алюмината магния; *е*, *ж* — алюмината кальция

Исследования показали, что на эксплуатационную надежность СКМ существенно влияет адгезионная прочность межслойных границ. Адгезионная прочность межслойных границ СКМ «сталь — резина», скрепленных клеем на основе хлоропренового каучука (рис. 6, 1) и горячей вулканизацией (рис. 6, 2), существенно отличается.

На рис. 6 видно, что у СКМ, скрепленных клеем, адгезионная прочность с резиной больше, чем у СКМ, соединенных горячей вулканизацией под давлением. Адгезионная прочность образцов из стали П40Х с резиной практически одинакова при использовании обоих способов склеивания и составила 0,21 и 0,2 МПа соответственно (рис. 6 *в* и рис. 6 *г*).

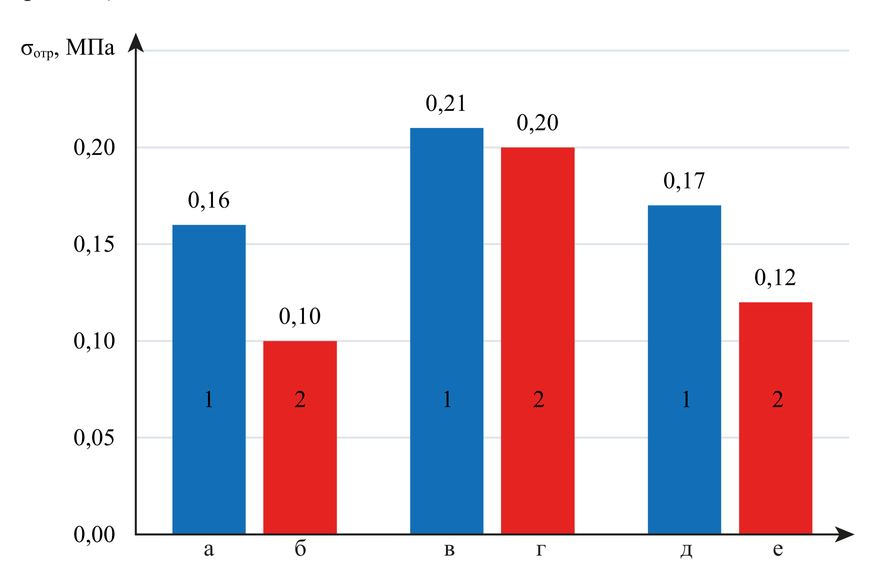


Рис. 6. Зависимость адгезионной прочности СКМ от технологии получения образцов стали: *а, б* — катанная 40Х; *в, г* — спеченная П40Х; *д, е* — горячедеформированная П40Х

При испытании на ударно-абразивную износостойкость СКМ, скрепленные клеем, разрушались вследствие перенапряжений вдоль границы «металл — резина», обусловленных их существенно различными жесткостью, степенью деформации и возникающим при этом по мере развития сдвиговых деформаций сложнонапряженным состоянием [14].

Поэтому дальнейшие исследования были направлены на увеличение адгезионной прочности спеченной стали П40Х с резиной, соединенных методом горячей вулканизации. Одним из способов увеличения адгезионной прочности является добавление в состав шихты меди (рис. 7), которая при спекании свыше температуры ее плавления под воздействием сил поверхностного натяжения растекается по свободной поверхности частиц и межчастичным границам. Это способствует увеличению поверхностной пористости прессовок.

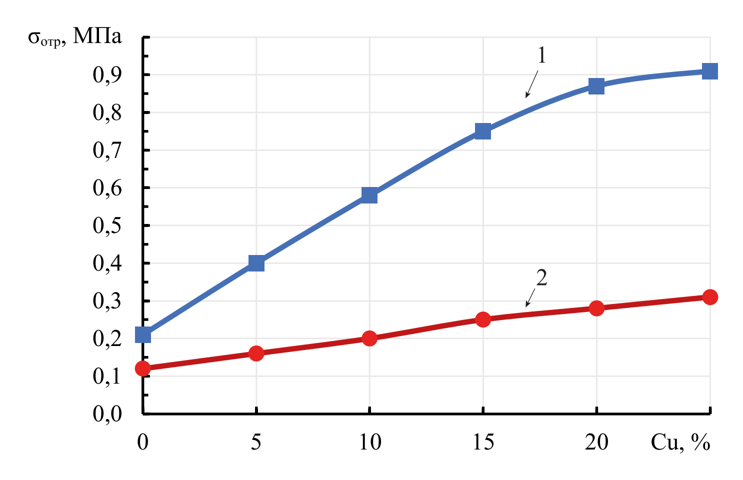
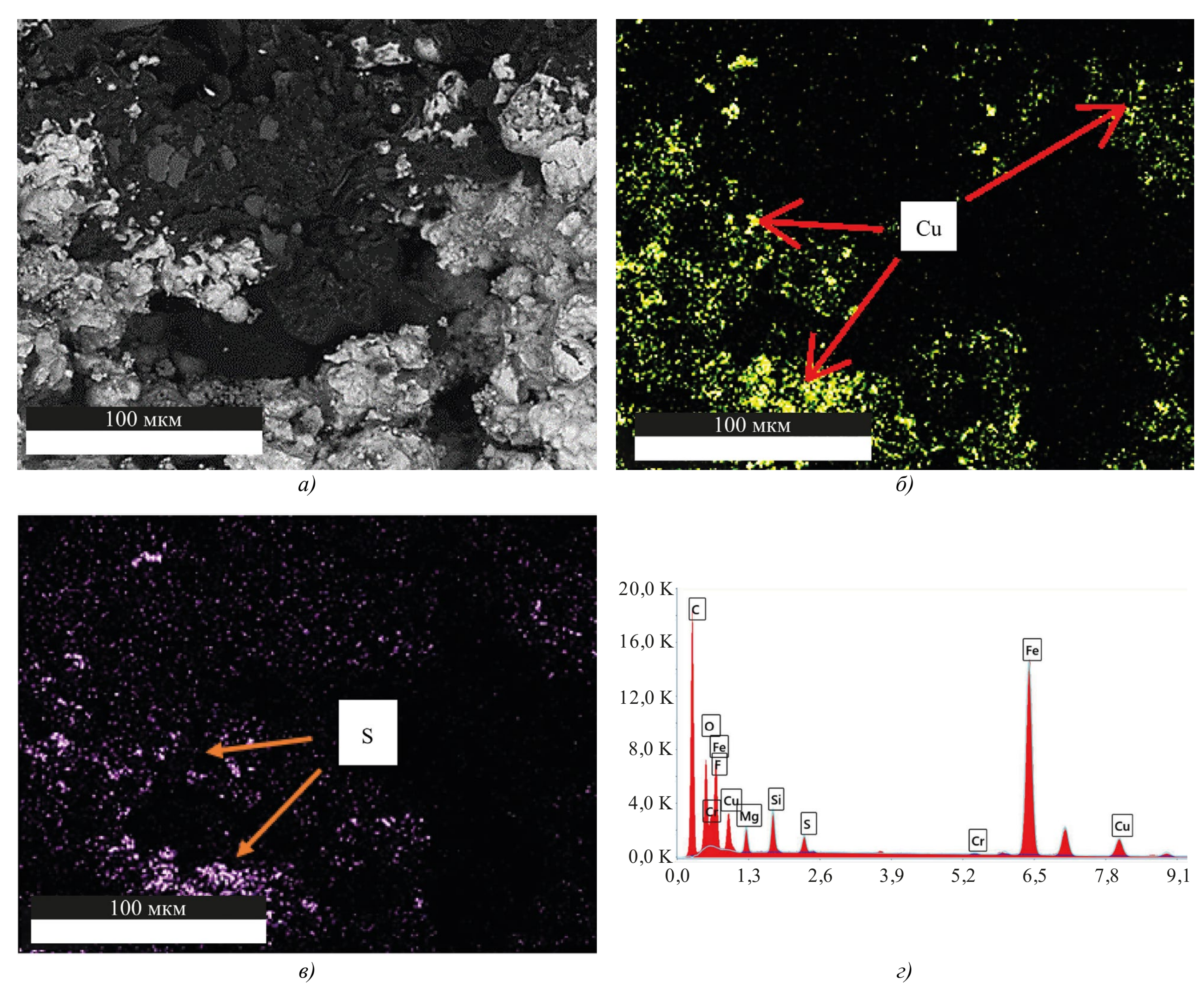


Рис. 7. Влияние меди на адгезионную прочность СКМ из спеченной (1) и горячедеформированной стали П40Х (2)

На рис. 7 показано, что увеличение концентрации меди в спеченной стали П40Х приводит к увеличению адгезионной прочности СКМ с 0,1 до 0,93 Мпа, тогда как прочность межслойных границ СКМ с горячедеформированной сталью повышается незначительно (с 0,05 до 0,3 МПа) из-за того, что при динамическом горячем прессовании происходит сглаживание поверхности и большинство пор закрывается.

При горячей вулканизации под давлением происходит вдавливание сырой резины в поры на поверхности спеченной стали П40Х (рис. 8 *а*) и в процессе происходит сульфидирование меди и железа, а между частицами меди и резиной образуются промежуточные пленки сульфида меди нестехиометрического состава типа Cu_xS [15], которые повышают адгезию резины с матрицей спеченной стали.



а) *б)*

в) *г)*

Рис. 8. Микроструктура переходной зоны СКМ:
а — спеченная сталь — резина; *б* — распределение меди; *в* — серы; *г* — других элементов

Анализ результатов картирования межслойной границы СКМ «спеченная сталь — резина» выявил зоны распределения элементов меди (рис. 8 *б*) и серы (рис. 8 *в*). Так, в зонах, обогащенных медью, вследствие образования сульфидов меди возрастает концентрация серы, что приводит к увеличению адгезии СКМ.

Обсуждение и заключение. Как показали исследования, интенсивность ударно-абразивного изнашивания зависит от структуры стали 40Х, энергии удара и химического состава абразивных частиц. Установлено, что с увеличением энергии удара с 3 до 9 Дж интенсивность абразивного износа образцов из стали 40Х повышается и мало зависит от вида термической обработки. Это связано с тем, что при этих значениях энергии удара твердые частицы абразива активно внедряются в поверхность образца, запуская механизм ударно-абразивного изнашивания. Увеличение энергии удара с 9 до 22 Дж приводит к снижению интенсивности изнашивания из-за того, что твердые абразивные частицы оксида кремния и алюминия, алюмината магния, не успевая внедриться в поверхность образца, разрушаются на более мелкие части и образуют более мелкие лунки, а частицы алюмината кальция активно разрушаются, закрепляясь в образованных лунках, микропорах и других дефектах.

Выявлено, что при добавлении в шихту от 5 до 20 % меди адгезионная прочность межслойных границ СКМ «сталь — резина» повышается в 3–4 раза в результате растекания меди под воздействием сил поверхностного натяжения по свободной поверхности частиц и межчастичным границам, а также образования сульфидов меди Cu_xS при горячей вулканизации под давлением.

Список литературы / References

1. Гусев А.И., Козырев Н.А., Усольцев А.А., Крюков Р.Е., Михно А.Р. Повышение надежности и долговечности деталей горношахтного оборудования, работающего в условиях интенсивного ударно-абразивного износа, путем наплавки. *Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов.* 2021;(7):199–204.

Gusev AI, Kozyrev NA, Usoltsev AA, Kryukov RE, Mikhno AR. Improving the Reliability and Durability of Mining Equipment Parts Operating under Conditions of Intense Impact and Abrasive Wear by Surfacing. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov.*2021;(7):199–204. (In Russ.)

2. Абдюкова Р.Я., Багаутдинов Н.Я. Анализ причин отказов клапанов буровых насосов. *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов.* 2012;(4):65–70. https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2012-4-65-70

Abdyukova RYa, Bagautdinov NYa. The Analysis of Drilling Pump Clack Valves Failures. *Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products.* 2012;(4):65–70. https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2012-4-65-70 (In Russ.)

3. Гадалов В.Н., Кутепов С.Н., Петренко В.Р., Калинин А.А. Оценка повреждаемости деталей насосов бурового оборудования в режиме их эксплуатации. *Известия ТулГУ. Технические науки.* 2022;(10):492–499. https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-10-492-499

Gadalov VN, Kutepov SN, Petrenko VR, Kalinin AA. Assessment of Damage to Pump Parts of Drilling Equipment in Their Operation Mode. *News of the Tula State University. Technical Sciences.* 2022;(10):492–499. https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-10-492-499 (In Russ.)

4. Бабаев С.Г., Габибов И.А., Меликов Р.Х. *Основы теории надежности нефтепромыслового оборудования.* Баку: Азербайджанская государственная нефтяная академия; 2015. 400 с. URL: https://www.anl.az/el_ru/kniqi/2015/Ap2015-51.pdf (дата обращения: 22.05.2024).

Babaev SG, Gabibov IA, Melikov RKh. *Fundamentals of the Theory of Reliability of Oilfield Equipment.* Baku: Azerbaijan State Oil Academy; 2015. 400 p. URL: https://www.anl.az/el_ru/kniqi/2015/Ap2015-51.pdf (accessed: 22.05.2024). (In Russ.)

5. Братковский Е.В., Шаповалов А.Н., Дема Р.Р. Повышение ударно-абразивной стойкости. *Вестник машиностроения*. 2019;(3): 64–67.

Bratkovskiy EV, Shapovalov AN, Dema RR. Increasing the Shock-Abrasive Resistance of Steels. *Vestnik mashinostroeniya*. 2019;(3): 64–67. (In Russ.)

6. Гадалов В.Н., Губанов О.М., Филонович А.В. Оценка повреждаемости деталей насосов бурового оборудования в режиме их эксплуатации. *Справочник. Инженерный журнал*. 2023;6(315):22–27. https://doi.org/10.14489/hb.2023.06.pp.022-027

Gadalov VN, Gubanov OM, Filonovich AV. Assessment of Damage to Pump Parts Drilling Equipment in Their Operation Mode. *Spravochnik. Inzhenernyi Zhurnal*. 2023;6(315):22–27. https://doi.org/10.14489/hb.2023.06.pp.022-027 (In Russ.)

7. Гасанов Б.Г., Сиротин П.В. Порошковые материалы для деталей, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания. *Металлург*. 2011;(3):61–64.

Gasanov BG, Sirotin PV. Powder Materials for Components Operating Under Impact-Abrasive Wear Conditions. *Metallurg*. 2011;(3):61–64. (In Russ.)

8. Kwiatkowski K, Nachman M. The Abrasive Wear Resistance of the Segmented Linear Polyurethane Elastomers Based on a Variety of Polyols as Soft Segments. *Polymers*. 2017;9(12):705. http://doi.org/10.3390/polym9120705

9. Гасанов Б.Г., Сиротин П.В., Ефимов А.Д. *Установка для испытания на ударно-абразивное и ударно-гидроабразивное изнашивание конструкционных и специальных материалов*. Патент РФ, № 2434219. 2011. URL: https://allpatents.ru/patent/2434219.html (дата обращения: 22.05.2024).

Gasanov BG, Sirotin PV, Efimov AD. *Installation for Testing the Impact-Abrasive and Impact-Waterjet Wear of Structural and Special Materials.* Patent RF, No. 2434219. 2011. URL: https://allpatents.ru/patent/2434219.html (accessed: 22.05.2024). (In Russ.)

10. Гасанов Б.Г., Сиротин П.В. Установка для исследования ударно-абразивного и ударно-гидроабразивного износа. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* 2010;76(11):60–63.

Gasanov BG, Sirotin PV. A Unit for Studying the Impact-Abrasive and Impact-Hydroabrasive Wear. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials.* 2010;76(11):60–63. (In Russ.)

11. Кухарев А.С., Гилаев Г.Г. Состав и параметры буровых растворов, необходимые для разработки месторождений нефти и газа. Охрана окружающей среды при работе с буровым раствором. В: *Труды II Международной научно-практической конференции.* Краснодар: Издательский Дом — Юг; 2022. С. 56–62.

Kuharev AS, Gilaev GG. The Composition and Parameters of Drilling Fluids Required for the Development of Oil And Gas Fields. Environmental Protection when Working with Drilling Mud. In: *Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference.* Krasnodar: Publishing House — Yug; 2022. P. 56–62. (In Russ.)

12. Сиротин П.В., Гасанов Б.Г., Исмаилов М.А. Установка для определения упругих и демпфирующих характеристик порошковых материалов с упруго-диссипативной подложкой. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* 2021;87(6):63–69. https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-6-63-69

Sirotin PV, Gasanov BG, Ismailov MA. Installation for Determination of the Elastic and Damping Characteristics of Powder Materials with an Elastic-Dissipative Substrate. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials.* 2021;87(6): 63–69. https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-6-63-69 (In Russ.)

13. Сиротин П.В., Исмаилов М.А. *Стенд для статических испытаний композиционных многослойных материалов (Варианты).* Патент РФ, № 2725530. 2020. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2725530C1_20200702.pdf (дата обращения: 22.05.2024).

Sirotin PV, Ismailov MA. *Bench for Static Tests of Composite Multilayer Materials (Versions).* Patent RF, № 2725530. 2020. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2725530C1_20200702.pdf (accessed: 22.05.2024). (In Russ.)

14. Гасанов Б.Г., Исмаилов М.А., Харченко Е.В. Повышение адгезионной прочности в межслойных границах порошковых железомедных сплавов с резиной. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение. Материаловедение*. 2022;24(4):26–34. https://doi.org/10.15593/2224-9877/2022.4.03

Gasanov BG, Ismailov MA, Kharchenko EV. Increasing the Adhesive Strength in the Interlayer Boundaries of Powdered Iron-Copper Alloys with Rubber. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2022;24(4):26–34. https://doi.org/10.15593/2224-9877/2022.4.03 (In Russ.)

15. Никифорова Н.А., Шерышев М.А. Способы увеличения адгезионной прочности на границе резина — металлокорд. *Успехи в химии и химической технологии*. 2011;25(3(119)):24–28.

Nikiforova NA, Sheryshev MA. Ways to Increase the Adhesive Strength at the Rubber — Metal Cord Boundary. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2011;25(3(119)):24–28. (In Russ.)

Об авторе:

Маркиз Азизович Исмаилов, старший преподаватель кафедры автомобили и транспортно-технологические комплексы Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова (346428, Российская Федерация, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132), SPIN-код: 9370-9816, ORCID, al_myalim@mail.ru

Конфликт интересов: **автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.**

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Markiz A. Ismailov, Senior Lecturer of the Department of Automobiles and Transport and Technological Complexes, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) (132, Prosveshcheniya Str., Novocherkassk, 346428, RF), SPIN-code: 9370-9816, ORCID, al_myalim@mail.ru

Conflict of Interest Statement: **the author declares no conflict of interest.**

The author has read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 24.06.2024
Поступила после рецензирования / Revised 18.07.2024
Принята к публикации / Accepted 28.07.2024